

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«___» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Аналіз коригуючих властивостей надлишкових кодів за умов
сталості продуктивності джерела інформації»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-61

Корнієнко Андрій Андрійович _____

Керівник:

завідувач кафедри телекомунікаційних систем ІТС

д.т.н., проф. Уривський Леонід Олександрович _____

Рецензент:

доцент кафедри Інформаційно-телекомунікаційних мереж

к.т.н., доц. Правило Валерій Володимирович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2020

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Програма професійного спрямування (спеціалізація) – «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Корнієнка Андрія Андрійовича

1. Тема роботи «Аналіз коригуючих властивостей надлишкових кодів за умов сталої продуктивності джерела інформації», керівник роботи Уривський Леонід Олександрович, д. т. н., професор, затверджені наказом по університету від «30» березня 2020 р. № 924-с.
2. Термін подання студентом роботи: 12 червня 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи: вид модуляції, що використовується – QAM-4, QAM-16, QAM-64, QAM-256, QAM-1024; задані вимоги щодо достовірності прийому символів джерела – $P = 10^{-6}$; використовуються блокові надлишкові коди з різною довжиною блоку.
4. Зміст роботи: визначити характеристики потреб споживачів у телекомунікаційних послугах з наступним аналізом можливостей сучасних систем зв'язку та ресурсів, що вони використовують, задовольнити ці потреби; провести аналіз відомих формулювань з вирішення проблеми

надання високоякісного зв'язку при фіксованому ресурсі системи зв'язку; провести аналіз методик забезпечення заданої достовірності з використанням коригуючих кодів при фіксованих ресурсах каналу зв'язку; описати методику забезпечення заданої достовірності за умов сталої швидкості джерела повідомлень.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

- 1) Тема, мета та завдання бакалаврської дипломної роботи;
- 2) Можливості сучасних систем зв'язку задовольняти потреби споживача, надаючи високоякісні телекомунікаційні послуги, використовуючи ресурси каналу зв'язку;
- 3) Вплив взаємозв'язку ресурсів каналу зв'язку, модуляції та параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності;
- 4) Методика забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку при фіксованих ресурсах каналу зв'язку;
- 5) Методика забезпечення заданої достовірності за умов сталої швидкості джерела повідомлень;
- 6) Висновки та рекомендації.

6. Дата видачі завдання: 28 вересня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<p>Робота над третім розділом:</p> <p>1) описати способи надання високоякісного зв'язку за заданих умов (п. 3.1);</p> <p>2) вирішення задачі забезпечення заданої достовірності без зміни швидкості джерела повідомлень за рахунок додаткового ресурсу (п. 3.2);</p> <p>3) провести оцінку отриманого дослідження, а саме звернути на результат, оскільки потрібно раціонально використовувати ресурси. (п. 3.3);</p> <p>4) описати методику забезпечення заданої достовірності на</p>	13.04.20 – 20.04.20	Виконав

	основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду за умов сталої швидкості джерела повідомлень (п. 3.4)		
2	<p>Робота над другим розділом:</p> <p>1) описати взаємозв'язок ресурсів каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності (п. 2.1);</p> <p>2) проаналізувати вплив типу модуляцій та параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності при обмежених умовах (п. 2.2.)</p> <p>3) провести аналіз методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду при фіксованих ресурсах каналу зв'язку.</p>	20.04.20 – 27.04.20	Виконав
3	<p>Робота над першим розділом:</p> <p>1) розкрити характеристику потреб споживачів телекомунікаційних послуг у сучасному світі та можливості сучасних систем зв'язку з надання телекомунікаційних послуг із необхідною якістю та характеристику ресурсів сучасних систем зв'язку з позицій забезпечення необхідною достовірністю передачі інформації на фізичному рівні. (п. 1.1, п. 1.2);</p> <p>2) проаналізувати відомі формулювання щодо вирішення проблеми надання зв'язку із необхідною достовірністю при використанні сталого обсягу ресурсів телекомунікаційної системи (п. 1.3);</p> <p>3) виконати постановку завдання щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу (п. 1.4).</p>	27.04.20 – 04.05.20	Виконав
4	<p>Оформлення дипломної роботи:</p> <p>1) написання вступу та висновків до 1-3 розділів, а також висновку до дипломної роботи.</p> <p>2) оформлення роботи (нумерація рисунків, абзаци тощо), переліку скорочень та літератури</p>	04.05.20 – 11.05.20	Виконав

Студент

Андрій КОРНІЄНКО

Керівник роботи

Леонід УРИВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 81 с., 20 рис., 11 табл., 43 джерел.

Робота присвячена забезпеченню необхідної достовірності передачі інформації. Розвиток сучасних систем зв'язку рухається у бік збільшення швидкості передачі. При цьому підтримка якості передачі цих систем, є не менш важливою ланкою для визнання, розповсюдження та використання цих систем операторами та провайдерами, щоб забезпечити потреби споживача, який користується телекомунікаційними послугами.

Мета роботи – висвітлення основних параметрів блокових завадостійких кодів та формулювання рекомендацій щодо методики синтезу блокових кодів, які забезпечують незмінність продуктивності та швидкості джерела повідомлень.

В даній роботі розглядаються потреби споживача в телекомунікаційних послугах, сучасні системи зв'язку задовольняючі ці телекомунікаційні послуги, основні методики та інструменти забезпечення заданої достовірності при певних умовах в каналі зв'язку, вплив модуляції та параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності та здійснюється розробка рекомендацій щодо методики синтезу блокових кодів, параметри яких забезпечать сталість продуктивності та швидкості джерела повідомлень.

ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ, ТЕОРІЯ КОДУВАННЯ, ЗАВАДОСТІЙКІЙ КОД, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ДОСТОВІРНІСТЬ, ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ, БІНОМІАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ, ДОВЖИНА БЛОКУ КОДУ, МОДУЛЯЦІЯ

ABSTRACT

Text part of the thesis: 81 p., 20 fig., 11 Table., 43 sources.

The work is devoted to ensuring the necessary reliability of information transfer. The development of modern communication systems is moving towards increasing the speed of transmission. At the same time, maintaining the quality of transmission of these systems is no less important for the recognition, distribution and use of these systems by operators and providers to meet the needs of consumers who use telecommunications services.

The purpose of the work is to highlight the main parameters of block noise-tolerant codes and formulate recommendations on the method of synthesis of block codes, which ensure consistency of performance and speed of the message source.

This paper considers the needs of the consumer in telecommunications services, modern communication systems satisfying these telecommunications services, basic techniques and tools to ensure a given reliability under certain conditions in the communication channel, the impact of modulation and redundancy parameters on a given reliability and develops recommendations on the method of synthesis of block codes, the parameters of which will ensure the consistency of performance and speed of the message source.

INFORMATION THEORY, CODING THEORY, ERROR CONTROLLED CODE, PRODUCTIVITY, CERTAINTY, BIT ERROR PROBABILITY, BINOMIAL DISTRIBUTION, CODE BLOCK LENGTH, MODULATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТА СТРУКТУРИ РОБОТИ	12
1.1 Характеристика потреб споживачів телекомунікаційних послуг у сучасному світі та можливості сучасних систем зв'язку з надання телекомунікаційних послуг із необхідною якістю	12
1.2 Характеристика ресурсів сучасних систем зв'язку з позицій забезпечення необхідною достовірності передачі інформації на фізичному рівні	21
1.3 Аналіз відомих формулювань щодо вирішення проблеми надання зв'язку із необхідною достовірністю при використанні сталого обсягу ресурсів телекомунікаційної системи.....	28
1.4 Постановка завдання щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу.....	30
1.5 Висновки з розділу 1	31
2 АНАЛІЗ МЕТОДИК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ КОРИГУЮЧИХ КОДІВ ПРИ ФІКСОВАНИХ РЕСУРСАХ КАНАЛА ЗВ'ЯЗКУ	33
2.1 Взаємозв'язок енергетичних та частотних характеристик каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності	33
2.2 Аналіз впливу типу модуляцій та параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності фіксованих ресурсах каналу зв'язку	37
2.2.1 Аналіз впливу типу модуляції на параметри передачі системи зв'язку	37
2.2.2 Аналіз впливу параметрів надлишкових кодів на параметри передачі системи зв'язку	42
2.2.3 Граничне значення блоку кодів Хеммінга при заданих вимогах до достовірності прийому.....	47

2.3 Аналіз методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду при фіксованих ресурсах каналу зв'язку	52
2.4 Висновки до розділу 2.....	56
3 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ЗА УМОВ СТАЛОЇ ШВИДКОСТІ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ	58
3.1 Способи вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу	58
3.2 Вирішення задачі забезпечення заданої достовірності без зміни швидкості джерела повідомлень за рахунок додаткового ресурсу	66
3.3 Оцінка утримання продуктивності при фіксованому енергетичному ресурсі за рахунок частотного ресурсу	69
3.4 Опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду за умов сталої швидкості джерела повідомлень.....	72
3.5 Висновки до розділу 3.....	74
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	77
ДОДАТОК А.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

LTE	Long-Term Evolution – довготривалий розвиток
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – інститут інженерів електротехніки та електроніки
ITU-R (MCE-P)	International Telecommunication Union, Radio communication – сектор радіозв’язку Міжнародного Союзу Електрозв’язку
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing – ортогональне частотне мультиплексування
IMT	International Mobile Telecommunication – міжнародний мобільний зв'язок
MIMO	Multiple Input Multiple Output – множинні входи, множинні виходи
IP	Internet Protocol – міжмережевий протокол
Wi-Fi	Wireless Fidelity – бездротова точність – технологія бездротової локальної мережі з пристроями на основі стандартів IEEE 802.11
QAM-M (KAM-M)	Quadrature Amplitude Modulation, Multiplicity – квадратурна амплітудна модуляція, кратність
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying – квадратурна фазова маніпуляція
BPSK	Binary Phase-Shift Keying – двійкова фазова маніпуляція
CES	Consumer Electronics Show – виставка побутової електроніки
GI	Guard Interval – тривалість захисного інтервалу

ВСТУП

На даному етапі розвитку людства телекомунікації є невід'ємною частиною інформаційного суспільства. Споживачі замовляючи телекомунікаційні послуги у провайдерів та операторів зв'язку сподіваються на отримання високоякісного зв'язку для обміну інформацією з іншими споживачами.

Телекомунікації є однією з найважливіших галузей економіки в Україні на даний момент, оскільки вони спрямовані на задоволення потреб користувачів системами зв'язку. На ринку зв'язку висока конкуренція між операторами зв'язку за користувачів, бо саме останні впливають на їх заробіток та подальший розвиток. Саме споживач встановлює вимоги до надання телекомунікаційних послуг своїм вибором тієї чи іншої послуги у якогось оператора зв'язку. Тому інтереси та вимоги споживача цих послуг завжди стоять на першому місці для телекомунікаційних компаній.

Потреби та вимоги споживача постійно зростають, з кожним днем він хоче отримувати все більшу і більшу кількість інформації за той же самий час, чи навіть менший. Саме тому, щоб задовольнити потреби споживача операторам потрібно завжди покращувати свої послуги зв'язку. Інженери усього світу працюють над розвитком систем зв'язку у напрямку підвищення швидкості передачі інформації.

При збільшенні швидкості передачі системи зв'язку завжди потрібно пам'ятати про достовірність цієї передачі. При ігноруванні підтримки потрібної достовірності, за рахунок помилок, які виникають через параметри каналу зв'язку, інформація втрачає свої корисні властивості. Це звісно понижує якість надання телекомунікаційних послуг.

Робота присвячена завадостійким надлишковим кодам, параметри яких можуть підтримувати достовірність, а саме їх коригуючим властивостям. Модулюючи декілька різних станів каналу зв'язку та висуваючи певні обмеження, потрібно сформулювати узагальнені рекомендації щодо пошуку

параметрів надлишкових блокових кодів, які забезпечать необхідну достовірність передачі інформації.

Для розглядання та вирішення поставлених задач було використано біноміальну модель генерації помилок у каналі зв'язку та методику аналізу завадостійких можливостей блокових кодів. Біноміальна модель представляє собою зручний інструмент для визначення виправної здатності надлишкового коду, коли методика аналізу можливостей визначає інші параметри коду, одночасно даючи знати про реальні та найкращі можливості цього коду.

В першому розділі спочатку визначається найголовніша потреба споживача телекомунікаційних послуг та можливості сучасних систем зв'язку забезпечити ці потреби. Далі розглядається характеристика ресурсів каналу зв'язку, за допомогою яких система зв'язку забезпечує потреби споживача. Проводиться аналіз відомих формулювань щодо забезпечення достовірності при фіксованому ресурсі та виконується постановка завдання щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу.

У другому розділі розглянуто теоретичну основу інструментів забезпечення достовірності: модуляція та параметри надлишкових кодів. Сформовано покроково та виражено графічно методику забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду при фіксованих ресурсах каналу зв'язку.

У третьому розділі аналізується та описується методика забезпечення заданої достовірності за умов сталості швидкості джерела повідомлень. Приводиться вирішення задачі забезпечення необхідної достовірності за умов сталості швидкості джерела повідомлень за рахунок додаткового ресурсу. Після цього проводиться оцінка утримання продуктивності при фіксованому енергетичному ресурсі за рахунок частотного ресурсу.

1 ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТА СТРУКТУРИ РОБОТИ

1.1 Характеристика потреб споживачів телекомунікаційних послуг у сучасному світі та можливості сучасних систем зв'язку з надання телекомунікаційних послуг із необхідною якістю

На початку розвитку телекомунікаційних технологій можна було стати свідками великих успіхів інформаційних технологій, що стосуються безпосередньо кожної людини - це впровадження в повсякденне життя мобільного стільникового зв'язку та Інтернету. Найбільш затребуваним є мобільний стільниковий зв'язок, який дає кожній людині можливість передати або отримати інформацію практично в будь-який час і в будь-якому місці. Тим самим задовольняється одна з найбільш важливих потреб людини - інформаційна потреба.

Необхідність в інформації як новому знанні у людини з'явилася не в даний час у зв'язку з успіхами інформаційних технологій, а була завжди. Найбільш яскравим проявом інформаційної потреби людини є наукове пізнання навколишнього світу.

На різних історичних етапах розвивалися різні види інформаційної діяльності, і всі вони були спрямовані на отримання інформації як нового знання і передачу його іншим членам суспільства. Тим самим реалізовувалася інформаційна потреба людини як інформаційна свобода, як свобода спілкування. Відзначимо наступні основні етапи [1]:

1 етап - поява писемності, книгодрукування, газет.

На цьому етапі існувала можливість обмінюватися інформацією за допомогою символів - букв, нанесених на твердий носій, в якості якого найбільшою мірою використовувався папір;

2 етап - винахід Радіо в Росії в 1895 р О.С. Поповим.

З'явилася можливість практично миттєво обмінюватися інформацією спочатку в телеграфному режимі, потім в мовному. Радіо як новий технічний засіб ґрунтувалося на властивостях електромагнітних хвиль як особливого

виду матерії поширюватися в просторі з величезною швидкістю і переносити інформацію в значеннях своїх параметрів. Перша половина XX століття характеризується інтенсивним розвитком радіотехніки, якою були захоплені не тільки вчені і професійні інженери, а й прості люди. Інтенсивно розвивалося радіоаматорство, радіомовлення, освоювалися різні діапазони частот радіохвиль. Виявилося, що радіотехніка дозволяє не тільки обмінюватися інформацією на значній відстані, а й отримувати інформацію у вигляді виявлення та вимірювання просторово-часових параметрів невідомих віддалених об'єктів (радіолокація), а також отримувати інформацію про власне просторове положення об'єкта (радіонавігація), що надалі отримало розвиток в системи глобальної навігації, прикладом яких служить діюча система GPS (США) і створювана ГЛОНАСС (Росія). Таким чином можна бачити, що поява радіо стало етапом задоволення інформаційної потреби людини;

3 етап - поява телебачення. У 1939 р були проведені перші досліді з прийому і передачі зображення в СРСР, а в 1948 р почалося пробне телемовлення в Москві та Ленінграді.

Телебачення - це наступний важливий крок у реалізації інформаційної потреби людини, пов'язаний з інформаційним обміном не тільки звукових повідомлень, а й зображення. При цьому істотно збільшується інформаційна ємність технічних засобів, так як системи вже орієнтуються на зір людини, інформативність якого на порядок вище ніж слух людини. Маленький штрих до сучасного стану телебачення. У 1907 р в Росії був запатентований Б. Л. Розінгом винахід – катодної трубки, яка стала основою кінескопів, дисплеїв і різного роду індикаторів. В даний час у зв'язку з успіхами інтегральних технологій вона повністю замінюється рідкокристалічним індикаторами;

4 етап - розвиток стільникового зв'язку, поява якої дозволило практично донести до кожної людини можливість в будь-який час і в будь-якому місці обмінюватися інформацією з будь-якою людиною.

Перша стільникова система для цивільних користувачів з'явилася в США на початку 80-х років. У стільниковому зв'язку закладений вельми важливий у житті людини принцип - розосередження, розподіл в просторі. Інтенсивний розвиток стільникового мобільного зв'язку став можливий завдяки успіхам технології виробництва інтегральних мікросхем. Мікромініатюризація і дешевизна – ось причина глобальної доступності в даний час практично будь-якій людині стільникових засобів зв'язку. Виявилося, що стільниковий зв'язок потрібен всім, так як він є індивідуальним і найбільшою мірою задовольняв інформаційні потреби людини на тому етапі розвитку;

5 етап - виникнення Інтернету і його розвиток. Всесвітня павутина виявилася вельми затребуваною суспільством, так як дозволяла обмінюватися не тільки повідомленнями, але і зображеннями, програмами, відеофільмами, аудіозаписами і т.д., тобто самою різною інформацією.

Інтернет на даному етапі ще не можна назвати мобільним засобом, однак цей напрям у розвитку Інтернету був очевидний і перспективний. У разі досягнення такої ж мобільності як і стільниковий зв'язок, Інтернет найближчим часом мав стати засобом, в найбільшою мірою задовольняючим інформаційні потреби людини. Ця впевненість була заснована на перспективах розвитку технологій виробництва і виготовлення інтегральних схем, коли впроваджувались технології з роздільною здатністю 65 і 45 нм і освоювалися 32 і 18 нм. Інтернет-технології стали основою сучасних процесів інтеграції інформаційних технологій, коли досягнення в різних інформаційних областях об'єднуються в єдині призначені для користувача системи, що поєднують: стільниковий зв'язок, Інтернет, комп'ютер, фотоапарат, відеокамеру, аудіосистеми, керуючі та охоронні системи, і багато інших необхідних людині функцій.

Можна зробити висновок, що навіть на сучасному етапі розвитку суспільства, найголовнішою потребою споживача телекомунікаційних послуг є – інформаційна потреба. Споживач хоче отримати якомога більшу кількість

інформації, за якомога менший час, з відповідною якістю. При цьому у споживача на даному етапі розвитку сформувалися більш жорсткі вимоги до якості надання телекомунікаційних послуг.

Сучасні оператори зв'язку використовують опитувальні анкети, тестові дзвінки, щоб зрозуміти, що цікавить споживачів і чого вони чекають від послуг зв'язку. Для того щоб оцінити рівень якості необхідно знати думку населення. Існують показники якості, рівні яких визначають якість послуг і обслуговування. На сьогоднішній день використовують чотири основні показники якості:

- Доступність;
- Швидкість;
- Надійність.

Це технічні показники, які визначають якість роботи телекомунікаційної мережі. Споживачеві необхідно щоб зв'язок не переривався, була можливість зателефонувати в будь-якому місці, відправити повідомлення або зображення. При цьому споживач хоче, щоб телекомунікаційні послуги працювали швидко. Споживачам необхідно щоб зв'язок був надійний і безпечний.

Технічні показники якості визначають можливість телекомунікаційної мережі задовольняти потреби населення.

- Якість обслуговування.

Якість обслуговування це організаційний показник і грає велику роль для споживачів. Споживачеві необхідно щоб якість обслуговування у відділеннях оператора зв'язку було на високому рівні, надавалася зрозуміла і достовірна інформація. Велике значення має місце розташування відділень оператора зв'язку і можливість здійснювати операції в терміналах самообслуговування. Якість обслуговування це показник, який має велике значення при формуванні потреб населення.

Тобто для забезпечення інформаційної потреби споживача оператори та провайтери надають телекомунікаційні послуги, або їх ще називають

послуги зв'язку. Роль послуг зв'язку важко переоцінити, оскільки зв'язок використовується в побуті, промисловості, військовій сфері і навіть в космосі. Інакше кажучи, потреба у передачі інформації [20, 21] вирішується за допомогою телекомунікаційних систем, які побудовані на основі використання провідних і безпроводних каналів зв'язку [13, 22].

Існує багато різновидів зв'язку, які класифікують за рядом ознак: спосіб передачі інформації, тип використовуваного обладнання, масштабність мережі, якість покриття, області застосування та інше.

Сучасні послуги зв'язку можна розділити на кілька категорій (один із безліч можливих варіантів класифікації):

- електричний зв'язок. Велика група, в яку входить радіо і телевізійне мовлення, телефонний наземний зв'язок і бездротові способи передачі будь-якої інформації;

- мобільний зв'язок, як різновид електричного зв'язку. Найдоступніший і поширений вид зв'язку, який дає можливість швидкого обміну інформацією не тільки всередині певного регіону або країни, але і по всьому світу.

- поштовий зв'язок. Основне призначення полягає в наданні послуг з прийому та відправлення повідомлень (телеграми, листи) і цінних речей між окремими регіонами країни або різними державами в міжнародному форматі.

Розглядати потреби споживача у найрозповсюдженіших послугах зв'язку будемо за стислою класифікацією, а саме звернемо увагу на швидкість передачі даних сучасних систем. Інакше кажучи, розглянемо можливості сучасних систем зв'язку для надання високоякісного зв'язку (стільниковий зв'язок, мобільний Інтернет та аналогічні послуги по дротяному з'єднанню), який задовольняє потреби споживача у послугах, що надаються.

У зв'язку з потребами споживача отримувати великі об'єми інформації за короткий час, усі системи зв'язку розвиваються у напрямку збільшення швидкості передачі інформації. Але при цьому варто пам'ятати, що якою б не

була велика швидкість передачі системи зв'язку, якщо інформація спотворюється (втрачає цілісність), то ця інформація становиться некорисною і сенсу передавати, навіть, за такої високої швидкості її не має. Це значить, що, при збільшенні швидкості передачі системи вона безумовно повинна забезпечувати відповідну достовірність переданої інформації. Достовірність сучасних систем зв'язку досягається маніпулюванням ресурсами системи зв'язку, вибором необхідної модуляції (використанням складних сигналів), та використанням надлишкових кодів [19].

Сучасні засоби проводового зв'язку дозволяють нам відправляти і отримувати інформаційні дані різного плану на далекі відстані.

Інноваційні комунікації уможливили спілкування людей, що проживають не тільки на сусідніх вулицях, а й різних материках, що є одним з основних досягнень цивілізації.

Проводовий і безпроводовий зв'язок допомагає не тільки підтримувати відносини з близькими і рідними, він грає найважливішу роль в розвитку різних галузей діяльності людини.

На даний момент у світі масово налагоджене четверте покоління мобільного зв'язку та починається розгортання п'ятого покоління у деяких країнах. Саме на прикладі цих двох поколінь розберемо можливості сучасних систем стільникового зв'язку [16, 18].

Таблиця 1.1 – Порівняння двох поколінь систем стільникового зв'язку

Покоління	4G	5G
Початок розробки	2000	< 2018
Реалізація	2008 – 2010	2018
Швидкість передачі	100 Мбіт/с – 1 Гбіт/с	1 Гбіт/с – 20 Гбіт/с

Продовження таблиці 1.1

Стандарт	LTE-Advanced, WiMax Release 2 (IEEE 802.16m), WirelessMAN-Advanced	5G NR (New Radio)
Мережа	пакетна мережа передачі даних	
Сервіси	<ul style="list-style-type: none"> • велика ємність; • IP-орієнтована мережа, підтримка мультимедіа; • швидкості до сотень мегабіт в секунду. 	<ul style="list-style-type: none"> • висока середня швидкість передачі даних - від 1 Гбіт/с; • середня кількість одночасних підключень - 1 млн на км²; • затримка - до 1 мс; • висока енергетична ефективність.

У березні 2008 року сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-R) визначив ряд вимог для стандарту міжнародного рухомого бездротового широкосмугового зв'язку 4G, який отримав назву специфікацій International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced).

Основні дослідження при створенні систем зв'язку четвертого покоління ведуться в напрямку використання технології ортогонального частотного ущільнення OFDM [2]. Крім того, для максимальної швидкості передачі використовується технологія передачі даних за допомогою N антен і їх прийому M антенами - MIMO. При даній технології передають і прийомні антени рознесені так, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами.

Передові міжнародні мобільні телекомунікаційні системи (IMT-Advanced), визначені сектором радіозв'язку МСЕ, повинні відповідати деяким вимогам, щоб вважатися мережами покоління 4G:

- ґрунтуються на комутації пакетів, використовуючи протоколи IP;
- пікові швидкості передачі даних від 100 Мбіт/с для користувачів з високою мобільністю (від 10 км/год до 120 км/год) і від 1 Гбіт/с для користувачів з низькою мобільністю (до 10 км/год) [4];
- використовуються динамічно поділювані мережеві ресурси для підтримки більшої кількості одночасних підключень до однієї соти;
- їх масштабована смуга частот каналу 40 МГц [5] [6];
- мінімальні значення для пікового спектральної ефективності 15 біт/с/Гц в низхідному каналі і 6,75 біт/с/Гц у висхідному каналі (мається на увазі, що швидкість передачі інформації 1 Гбіт/с в низхідному каналі повинна бути можлива при смузі пропускання радіоканалу менше 67 МГц) [7];
- спектральна ефективність на сектор в низхідному каналі від 1,1 до 3 біт/с/Гц/сектор і в висхідному каналі від 0,7 до 2,25 біт/с/Гц/сектор [5];
- плавний хендовер (процес передачі обслуговування абонента під час виклику або сесії передачі даних від однієї базової станції до іншої) через різні мережі;
- висока якість мобільних послуг.

Розглядати п'яте покоління можливо лише опосередковано, оскільки за прогнозами тільки у цьому році повинно розпочинатись впровадження масово у світі.

У зв'язку з цим розглядати можливості такої системи зв'язку, можна лиш по даним тестування, тому що навіть повноцінно стандарти не затверджені. Наприклад, ще у 2016 році Huawei і Vodafone провели перші польові випробування стандарту 5G і відкрили лабораторію по дослідженню інтернету речей і домоглися пікової швидкості передачі даних 20 Гбіт/сек в діапазоні частот E (від 60 до 90 ГГц) в Ньюбері (Великобританія).

Тестуванню піддалися однокористувальницький (SU-MIMO) і розрахований на багато користувачів (MU-MIMO) багатоканальний вхід/вихід, що продемонстрували швидкість 20 Гбіт/сек і 10 Гбіт/сек відповідно.

Наприклад, звернемо увагу на технологію Wi-Fi 6, оскільки вона затребувана зараз в кожному домі будь-якої людини. Це стандарт бездротових локальних комп'ютерних мереж в наборі стандартів IEEE 802.11ax призначений для роботи в уже існуючих спектрах 2,4 ГГц і 5 ГГц, але може включати додаткові смуги частот в діапазонах від 1 до 7 ГГц при їх появі. На додаток до використання технологій MIMO і MU-MIMO (використовується кілька антен для прийому і передачі), в стандарті Wi-Fi 6 вводится режим ортогонального частотного мультиплексування (OFDMA) для поліпшення спектральної ефективності, і модуляція 1024-QAM для збільшення пропускної здатності. Хоча номінальна швидкість передачі даних тільки на 37% вище, ніж в попередньому стандарті IEEE 802.11ac, очікується, що Wi-Fi 6 дозволить в 4 рази збільшити середню пропускну здатність за рахунок більш ефективного використання спектра і поліпшень для щільного розгортання.

Остаточний текст стандарту IEEE 802.11ax був представлений в 2019 році (відповідно до таблиці 1.2). На виставці CES 2018 був представлений маршрутизатор компанією Asus (D-Link DIR-X9000), який продемонстрував максимальну швидкість до 11 Гбіт/с.

Тобто, можна зробити висновки, що при розвитку систем зв'язку у бік збільшення швидкості передачі даних завжди звертається увага на їх достовірність. При цьому виконується керування ресурсами системи, використовуються різні види сигнальних конструкцій, оскільки модуляція тісно пов'язана з енергетичним показником, і звичайно застосовуються надлишкові коди, які мають виправну здатність.

Таблиця 1.2 – Швидкість передачі в залежності від вибору параметрів для стандарту IEEE 802.11ах

Схеми модуляції та кодування для одного просторового потоку										
MCS індекс	Тип модуляції	Темп кодування	Швидкість передачі даних, (Мбіт/с)							
			Канали 20 МГц		Канали 40 МГц		Канали 80 МГц		Канали 160 МГц	
			1600 нс GI	800 нс GI	1600 нс GI	800 нс GI	1600 нс GI	800 нс GI	1600 нс GI	800 нс GI
0	BPSK	1/2	4	8,6	8	17,2	17	36	34	36
1	QPSK	1/2	16	17	33	34	68	72	136	144
2	QPSK	3/4	24	26	49	52	102	108	204	216
3	16-QAM	1/2	33	34	65	69	136	144	272	282
4	16-QAM	3/4	49	52	98	103	204	216	408	432
5	64-QAM	2/3	65	69	130	138	272	288	544	576
6	64-QAM	3/4	73	77	146	155	306	324	613	649
7	64-QAM	5/6	81	86	163	172	340	360	681	721
8	256-QAM	3/4	98	103	195	207	408	432	817	865
9	256-QAM	5/6	108	115	217	229	453	480	907	961
10	1024- QAM	3/4	122	129	244	258	510	540	1021	1081
11	1024- QAM	5/6	135	143	271	287	567	600	1134	1201

1.2 Характеристика ресурсів сучасних систем зв'язку з позицій забезпечення необхідною достовірністю передачі інформації на фізичному рівні

Будь-яка система передачі (система зв'язку) являється засобом передачі та прийому інформації по каналу зв'язку. Для виконання передачі інформації від передавача до приймача використовуються ресурси системи передачі і

каналу зв'язку [16, 23]. Поняття ресурсу можна визначити наступним чином [8]:

- Джерело, запас чого-небудь;
- Можливість, яку можна використати за необхідністю;
- Засіб, який можна використати для виробництва тих чи інших благ.

Інформацію необхідно враховувати особливим видом ресурсу – інформаційним ресурсом [9, 10], маючи на увазі розуміння «ресурсу» як запасу деяких знань, який зменшує міру невизначеності у випадку отримання інформація про об'єкт. На відміну від ресурсів, пов'язаних з матеріальними предметами, інформаційні ресурси являються невичерпними і припускають інші методи відтворення та поновлення, ніж фізичні ресурси.

В системах передачі для транспортування інформації по каналу зв'язку використовують наступні види фізичних ресурсів, які можна віднести до ресурсів з обмеженим запасом:

- Частотний ресурс (діапазон та смуга частот, що відводяться для лінії зв'язку);
- Енергетичний ресурс (потужність сигналу на вході та виході лінії зв'язку);
- Часовий ресурс (час відведений на передачу повідомлення від джерела до отримувача).

Також як ресурс системи передачі можна розглядати простір, оскільки телекомунікаційна мережа передбачає передачу інформації між передавачем та приймачем, що знаходяться на відстані, і це не залежить від середовища передачі.

Кожен з наведених видів ресурсу передбачає визначення кількісних характеристик ресурсу. Для визначення цих кількісних характеристик виконаємо опис каналу зв'язку та сигналу, який по ньому може передаватися.

Наведемо узагальнену спрощену структурну схему каналу зв'язку:

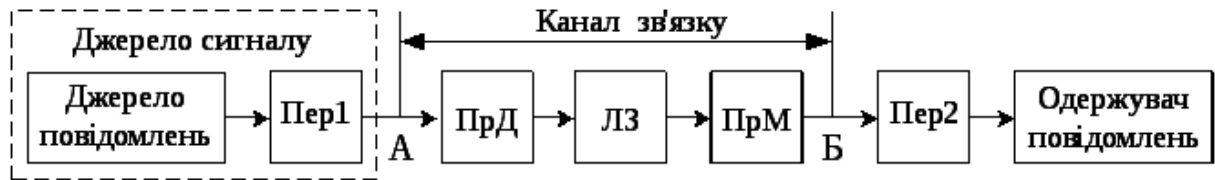


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема каналу зв'язку

Каналом зв'язку називається сукупність засобів, що забезпечують передачу сигналу від деякої крапки А системи до крапки Б (рис. 1.1). На цьому рисунку позначено Пер1- перетворювач повідомлення в сигнал; Пер2- перетворювач сигналу в повідомлення; ПрД – передавач; ПрМ – приймач; ЛЗ – лінія зв'язку. Крапки А та Б можуть бути обрані довільно, аби тільки між ними проходив сигнал. Частина системи зв'язку, розташована до крапки А, є джерелом сигналу для цього каналу. Якщо сигнали, що надходять на вхід каналу й ті, що з його виходу, є дискретними (по рівнях), то канал називається дискретним. Якщо вхідні й вихідні сигнали є безперервними (за рівнем), те й канал називається безперервним.

Канал зв'язку, застосовуваний для передавання сигналів, характеризують наступними основними параметрами (ресурсами, які розглядалися вище): часом роботи каналу зв'язку T_k , смугою частот пропускання каналів зв'язку ΔF_k і динамічним діапазоном D_k (перевищенням середньої потужності сигналу над середньою потужністю завад на виході каналу зв'язку):

$$D_k = \log \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (1.1)$$

Добуток основних параметрів каналу зв'язку називають об'ємом (ємністю) каналу зв'язку:

$$V_k = T_k \cdot \Delta F_k \cdot D_k, \quad (1.2)$$

Тепер звернемо увагу на ресурси сигналу, який передається та порівняємо їх. Для цього розглянемо відомі теореми Шеннона, які описують не тільки граничну межу каналу зв'язку, а й роблять акцент на надійності передачі інформації, та відносно неї розглянути залежність ресурсів сигналу, які потребуються для передачі.

В своїй першій роботі Шеннон сформував основну проблему надійної передачі інформації в термінах статичної теорії зв'язку, використовуючи ймовірнісні моделі для інформаційних джерел та каналів зв'язку. Застосовуючи ймовірнісний підхід, він знайшов універсальну логарифмічну міру для кількості інформації джерела. Він також показав, що існує деякий граничний показник, що характеризує швидкість передачі інформації по каналу зв'язку, що залежить від величини потужності передавача, ширини смуги пропускання та інтенсивності адитивного шуму, який він назвав пропускну здатністю каналу зв'язку. Наприклад, у випадку адитивного білого (з рівномірним спектром) гаусівського шуму ідеальний частотно-обмежений канал з шириною смуги ΔF_k має пропускну здатність C , біт/с, яка визначається формулою:

$$C = \Delta F_k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{\Delta F_k \cdot N_0} \right), \quad (1.3)$$

де P_c – середня потужність сигналу;

N_0 – спектральна щільність потужності адитивного шуму;

$\Delta F_k \cdot N_0 = P_{\text{ш}}$ – середня потужність шуму.

Значення пропускну здатності каналу C [3] полягає у тому, що якщо інформаційна швидкість (продуктивність) джерела R менша за пропускну здатність $R < C$, то теоретично можливо забезпечити надійну (вільну від помилок) передачу через канал з відповідним кодуванням. З другого боку, якщо $R > C$, то надійна передача неможлива, незалежно від способів обробки сигналу при передачі та прийомі. Таким чином, Шеннон встановив основні

обмеження передачі інформації та породив новий напрямок, який тепер зветься теорія інформації [11].

Отже, можна передавати інформацію по каналу з перешкодами без помилок, якщо швидкість передачі інформації:

$$R \leq \Delta F_c \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (1.4)$$

З (1.3) видно, що при $P_{\text{ш}} > P_c$ канал зв'язку має пропускну здатність. Застосовуючи методи фільтрації і завадостійкого кодування, можна передати інформацію і при $P_{\text{ш}} > P_c$. Ємність каналу зв'язку зі зменшенням потужності перешкод необмежено зростає (1.3). Однак, реалізувати канал зв'язку з необмеженою пропускну здатністю неможливо через наявність апаратних похибок, які зменшують пропускну здатність каналу зв'язку еквівалентно шумів. У реальних каналах зв'язку зазвичай $P_{\text{ш}} \ll P_c$ і одиницею в (1.3) можна знехтувати.

В цьому випадку максимальна кількість інформації, яку можна передати за час T_k :

$$V_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot D_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot \log \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (1.5)$$

де T_c – час передачі сигналу,

D_c – міра перевищення потужності сигналу над потужністю перешкод, ΔF_c – ширина спектра сигналу.

Величина $V_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot D_c$ може бути представлена у вигляді паралелепіпеда зі сторонами ΔF_c , D_c , T_c і отримала назву об'єм сигналу (рис.1.2).

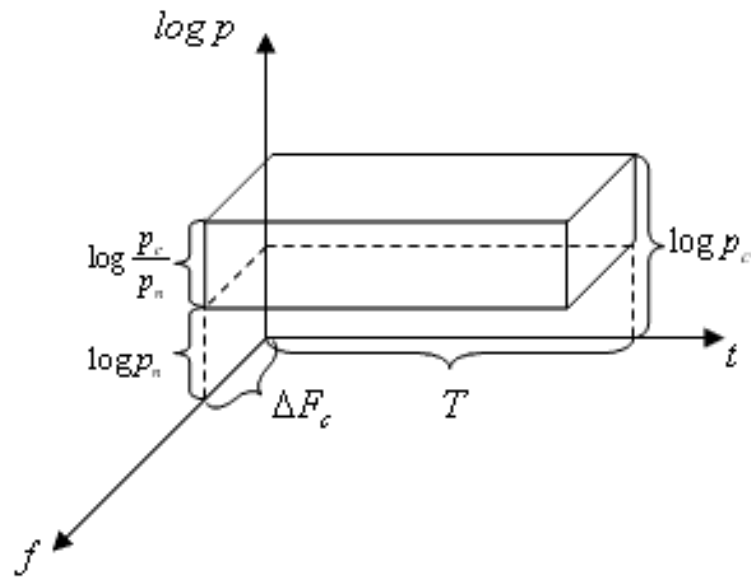


Рисунок 1.2 – Об'єм сигналу

Об'єм сигналу являє собою узагальнену фізичну характеристику сигналу. Аналогічно поняттю "об'єм каналу" зв'язку V_k (1.2).

Необхідною (але недостатньою) умовою передачі сигналу по каналу зв'язку є:

$$V_k \geq V_c, \quad (1.6)$$

Необхідними і достатніми умовами є більш жорсткі умови:

$$\Delta F_k \geq \Delta F_c \quad T_k \geq T_c \quad D_k \geq D_c, \quad (1.7)$$

Один і той же обсяг сигналу може бути отриманий при зменшенні або збільшенні одного з параметрів шляхом пропорційного збільшення або зменшення будь-якого іншого параметра відповідно. Це перетворення необхідно виконати, якщо необхідна умова (1.6) виконується, а одне або два нерівності з умов (1.7) не виконуються і об'єм сигналу "не вміщується" в об'ємі каналу.

Споживач при використанні телекомунікаційної послуги повинен бути впевнений, що послуга яка надається високоякісна, тобто з відповідною

швидкістю передачі інформації та потрібною якістю. Критерієм якості передачі являється достовірність переданої інформації, які кількісно виражається ймовірністю помилкового прийому біта [25, 26]. Достовірність інформації, що приймається залежить від ресурсів каналу зв'язку.

Розберемо, як саме кожен з розглянутих ресурсів впливає на достовірність передачі інформації.

Першим ресурсом розглянемо – енергетичний. Звертаючи увагу на таблицю 1.2, можна побачити, що в якості одного з параметрів для підтримання достовірності при підвищенні швидкості передачі використовується модуляція різної кратності. Модуляція впливає на ймовірність помилки на біт на виході каналу зв'язку. В деяких випадках при високому енергетичному показнику, тобто відношенню сигнал/шум, та використанню модуляції низької кратності, можна добитися потрібного значення ймовірності помилки на біт на виході каналу, яке повноцінно задовольнить достовірність передачі інформації, навіть, без використання кодування. Але при цьому, потрібно враховувати, що система буде працювати не ефективно з точки зору кількості переданої інформації. Тому при кращих енергетичних показниках доцільно при можливості переходити на модуляцію, яка має вищу кратність. Детальніше вплив модуляції та її зв'язок з енергетичним ресурсом розглянемо у другому розділі.

Частотний ресурс пов'язаний з енергетичним (1.3), а саме при його збільшенні з одного боку в нас зростає швидкість передачі у дискретному каналі зв'язку, що дуже добре, а з іншого боку при аналізі формули 1.3 можна побачити, що водночас при цьому знижується енергетичний показник – відношення сигнал/шум. При зниженні енергетичного показника в нас збільшується ймовірність помилки на біт на виході каналу зв'язку при сталій модуляції. І в цьому випадку, якщо нам потрібно забезпечити потрібну достовірність передачі інформації можна знизити кратність модуляції, чи використати надлишкові коди.

Саме ці два ресурси потрібно раціонально використовувати для вибору параметрів системи передачі, при яких будуть задовольнятися вимоги до швидкості передачі і при цьому забезпечуватися відповідна якість – потрібна достовірність передачі інформації. З цією метою потрібно використовувати одночасно теорію інформації та теорію завадостійкості [30].

1.3 Аналіз відомих формулювань щодо вирішення проблеми надання зв'язку із необхідною достовірністю при використанні сталого обсягу ресурсів телекомунікаційної системи

На практиці, при обмеженому ресурсі телекомунікаційної системи застосовуються завадостійкі коди [17], щоб забезпечити надання високоякісного зв'язку, тобто з необхідною достовірністю, оскільки вони можуть знаходити та виправляти помилки і ретельно підходять до вибору типу модуляції.

Цей спосіб вирішення даної проблеми широко використовується в сучасних телекомунікаційних системах. Для прикладу можна звернути увагу на таблицю 1.2, та зрозуміти, система при різних налаштуваннях завжди має певну схему кодування та тип модуляції, а значить, що без неї вона не працює.

При цьому завадостійкі коди призводять до зменшення швидкості передачі інформації, яка корисна, оскільки використовують пропускну здатність каналу одночасно для передачі повідомлень джерела та надлишкових повідомлень. Тому вибирати потрібно такі параметри коду, щоб швидкість передачі повідомлень була максимально можлива або максимально наближувалась до границі Шеннона [32, 37].

Для вирішення даної проблеми були розроблені такі інструменти: біноміальна модель генерації помилок у бінарному каналі, методика аналізу завадостійких можливостей блокових та неперервних кодів та розроблена

методика синтезу блокових завадостійких кодів, за яких відбувалось максимальне зближення з границею Шеннона [32, 37].

За допомогою біноміальної моделі можна сформулювати вимоги, щодо виправної здатності блокових завадостійких кодів, щоб забезпечити потрібну достовірність передачі, яку можливо виразити у ймовірності помилки на виході декодера.

Методика аналізу завадостійких можливостей [31, 38] передбачає за собою використання завадостійких границь кодування – Плоткіна та Варшамова-Гільберта, щоб провести оцінку завадостійких можливостей [29]. При наближенні до границі Варшамова-Гільберта можна знайти реальні блокові коди, а при наближенні до границі Плоткіна можна знайти найкращі за можливостями коди. Кодів з параметрами поза границею Плоткіна не існує.

Синтез блокових завадостійких кодів [36] складається з двох частин: спочатку знайти параметри кращого потенційно можливого завадостійкого коду, а потім вибрати параметри реального коду, які по можливості максимально наближаються до параметрів кращого коду.

Доцільність використання цієї методики передбачає в умовах обмежених ресурсів досягти таких цілей:

- економії ресурсу;
- раціонально надати ресурс споживачу;
- задовольнити вимоги споживача щодо достовірності передачі інформації при цьому максимально можливо не втратити у швидкості передачі;
- збільшити показники ефективності системи передачі.

У процесі вирішенню даної проблеми можуть бути використана методика розглянута вище, щоб забезпечити необхідну достовірність, у випадку повної сталості (незмінності) ресурсів зв'язку. Але потрібно завжди пам'ятати про можливість переходу на більш низьку кратність модуляції,

оскільки модуляція з меншою кратністю вимагає менше енергетичного ресурсу, щоб забезпечити необхідну достовірність.

1.4 Постановка завдання щодо вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу.

Метою дослідження являється аналіз параметрів блокових завадостійких кодів та формулювання рекомендацій щодо методики синтезу блокових кодів, які забезпечують незмінність продуктивності та швидкості джерела повідомлень.

Згідно мети роботи основними задачами є:

- 1) обґрунтування актуальності дослідження методу підтримання достовірності передачі інформації з використанням надлишкових кодів;
- 2) аналіз впливу ресурсів каналу зв'язку на достовірність передачі інформації;
- 3) аналіз впливу типу модуляцій та параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності при обмежених умовах;
- 4) аналіз методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду при фіксованих ресурсах каналу зв'язку.
- 5) опис способів вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу;
- 6) вирішення задачі забезпечення заданої достовірності без зміни швидкості джерела повідомлень за рахунок додаткового ресурсу;
- 7) аналіз оцінки утримання продуктивності при фіксованому енергетичному ресурсі за рахунок частотного ресурсу;

8) опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду за умов сталої швидкості джерела повідомлень.

Об'єктом дослідження є коригуючі властивості надлишкових кодів за умов сталої продуктивності джерела повідомлень.

Предметом дослідження являється способи вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу.

В даній роботі будуть розглядатися можливості надлишкових кодів забезпечувати необхідну достовірність за обмежених умов. Вплив ресурсів каналу зв'язку на достовірність передачі інформації. Розглядаються такі базові, але дуже важливі параметри як модуляція та кодування та більш детально параметри самих кодів: виправна здатність, довжина блоку коду та швидкість кодування. Особливо ретельно розглянемо вплив довжини блоку коду на забезпечення вимог щодо сталості продуктивності та швидкості джерела повідомлень.

Головними інструментами стануть: біноміальна модель генерації помилок у бінарному каналі та методика аналізу завадостійких можливостей блокових кодів.

Цільовими установками будуть досягнення відповідної сталої продуктивності джерела повідомлень при забезпеченні необхідної достовірності передачі інформації.

1.5 Висновки з розділу 1

1. Серед головніших потреб людства на всіх етапах її розвитку біла інформаційна потреба, вершиною реалізації якої стають інформаційно-телекомунікаційні системи, які здатні передавати великі обсяги інформації на великі відстані.

2. Розвиток телекомунікаційних систем завжди рухається у напрямку збільшення швидкості передачі, але при цьому завжди потрібно пам'ятати про достовірність передачі, забезпечення якої потребує в такому випадку більше ресурсів, а при неналежному забезпеченні достовірності спотворена інформація перестає мати свої корисні властивості;

3. Серед використаних ресурсів каналу зв'язку важливим параметром є енергетичний, він становить ядро змін характеристик телекомунікаційної системи з боку достовірності. Але часовий та частотний ресурси суттєво впливають на достовірність через енергетику каналу.

4. Розповсюдженим способом вирішення задачі забезпечення необхідної достовірності за певних умов являється використання завадостійких кодів, параметри яких можуть завжди забезпечити відповідну достовірність передачі інформації;

5. Головними інструментами для вирішення поставлених питань та задач у роботі стане біноміальна модель генерації помилок у бінарному каналі та методика аналізу завадостійких можливостей блокових кодів.

6. Метою дослідження являється аналіз параметрів блокових завадостійких кодів та формулювання рекомендацій щодо методики синтезу блокових кодів, які забезпечують незмінність продуктивності джерела повідомлень.

2 АНАЛІЗ МЕТОДИК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ КОРИГУЮЧИХ КОДІВ ПРИ ФІКСОВАНИХ РЕСУРСАХ КАНАЛА ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Взаємозв'язок енергетичних та частотних характеристик каналу зв'язку для забезпечення заданої достовірності

Ресурси каналу зв'язку (частота, потужність, час, простір, інформація), що розглядалися вище, в різних системах передачі можливо надати у вигляді показників функціонування цих систем.

Смуга займаних частот ΔF , наприклад, співвідноситься с каналною швидкістю V_c , наступним образом:

$$V_c, \left[\frac{\text{симв}}{\text{сек}} \right] = \Delta F, [\text{Гц}], \quad (2.1)$$

Тобто, звернувши увагу, на формулу 1.3 и використовуючи співвідношення 2.1, можна енергетичний ресурс записати, як:

$$h^2 = \frac{P_c}{V_c \cdot N_0}, \left[\frac{\text{Вт}}{\frac{\text{симв}}{\text{сек}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}} = \text{раз} \right], \quad (2.2)$$

де h^2 – інтегральний показник, що відображає зв'язок просторових та енергетичних параметрів каналу зв'язку [12, 40]. У загальному це співвідношення сигнал/шум. Використовуючи у розрахунках виражається у кількості раз, але для побудови графіків та детальних залежностей будемо зводити його у децибели;

P_c – середня енергія сигналу в точці прийому;

N_0 – одностороння спектральна потужність шуму.

Для остаточного пов'язання енергетичних показників характеристики сигналу та завади введемо показник α :

$$\alpha = \frac{P_c}{N_0}, [\mu\text{с}^{-1}], \quad (2.3)$$

Показник α – це масштабована величина, в даному випадку представлена в мікросекундах, оскільки дослідження у даній роботі будуть проводитися на мегабітних швидкостях.

А значить:

$$h^2 = \frac{\alpha}{V_c}, \quad (2.4)$$

Тобто з формул 2.1-2.4 можна побачити взаємозв'язок енергетичного та частотного ресурсу та провести аналіз щодо впливу цього взаємозв'язку на забезпечення заданої достовірності.

Спочатку розглянемо взаємозв'язок ресурсів, що розглядаються, і саме для цього побудуємо відповідний графік при $\alpha = 32, 40, 100 [\mu\text{с}^{-1}]$:

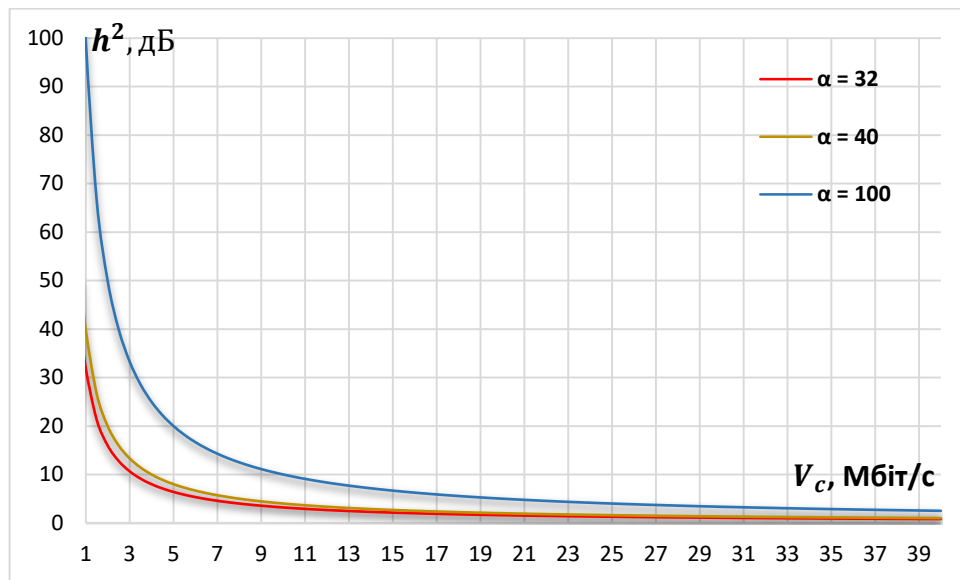


Рисунок 2.1 – Залежність енергетичного ресурсі від частотного

Можна побачити, що при будь-яких початкових енергетичних умовах в каналі зв'язку, якщо збільшувати швидкість передачі, а саме частотний

ресурс, буде зменшуватись енергетичний ресурс, який безпосередньо пов'язаний з достовірністю передачі інформації.

Розглянемо вплив енергетики каналу на достовірність, а саме на ймовірність помилки на виході каналу зв'язку. Існує два типи ймовірності помилки: символна та бітова. Наприклад, при використанні модуляції типу КАМ-М формули які описують цю залежність матимуть вигляд [11, 24, 41]:

$$p_{\text{сим}} = 1 - \left(1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(M)}{M-1} \cdot h^2 [\text{раз}]} \right) \right), \quad (2.5)$$

$$p_b = \frac{2}{\log_2(M)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(M)}{2 \cdot (M-1)}} \cdot h^2 [\text{раз}] \right), \quad (2.6)$$

Побудуємо графіки цих залежностей для наочності, вибравши при цьому тип модуляції – КАМ-16:

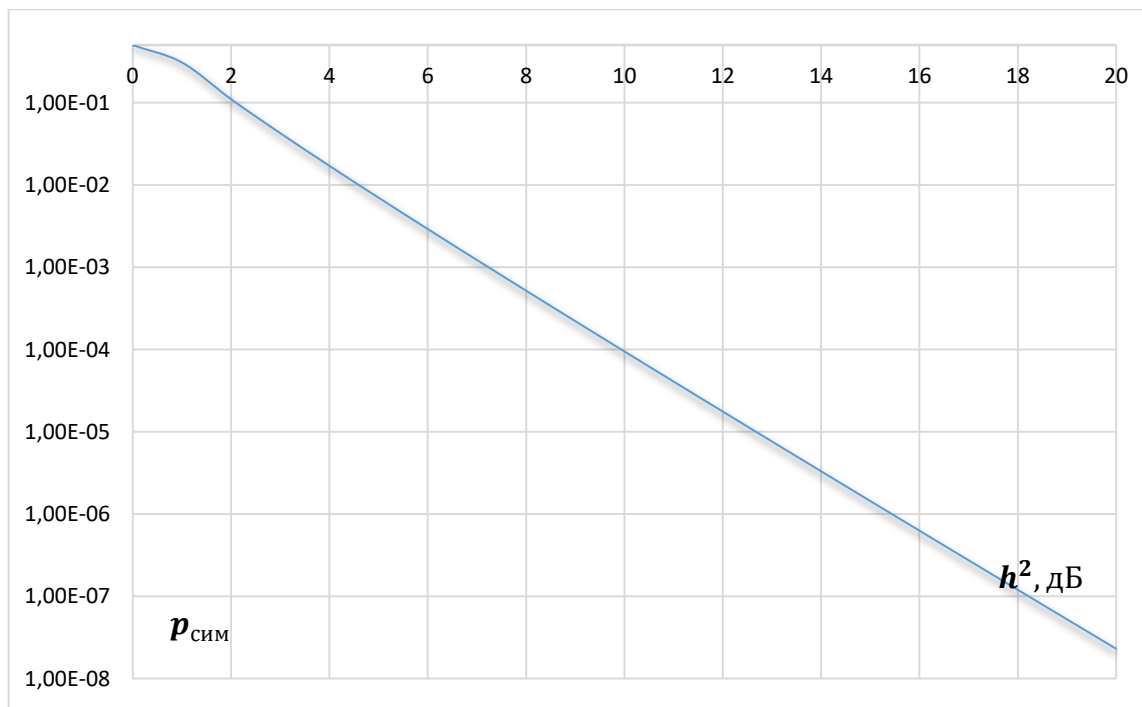


Рисунок 2.2 – Залежність символної ймовірності помилки від енергетики каналу зв'язку

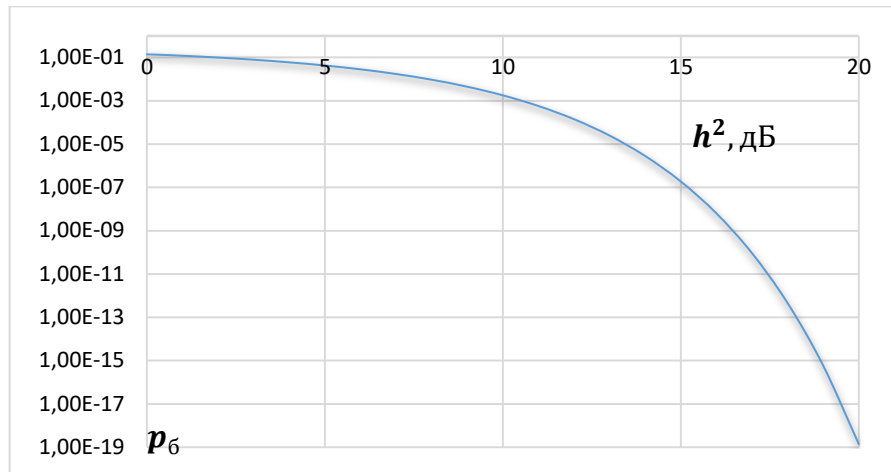


Рисунок 2.3 – Залежність бітової ймовірності помилки від енергетики каналу зв'язку

Як можна побачити, при збільшенні енергетичного ресурсу ймовірність помилки знижується, що є досить позитивною рисою. Але енергетичний ресурс не завжди безмежний, а найчастіше навіть обмежений, тому вважається досить дорогим задоволенням підтримувати його на високому рівні, бо для цього потрібно дороге обладнання та забезпечення відповідним каналом зв'язку.

Тепер розглянемо як саме впливає частотний ресурс на достовірність передачі. Для цього побудуємо графік залежності ймовірності помилки на біт від каналної швидкості при $\alpha = 32, 40, 100 \text{ } [\mu\text{s}^{-1}]$:

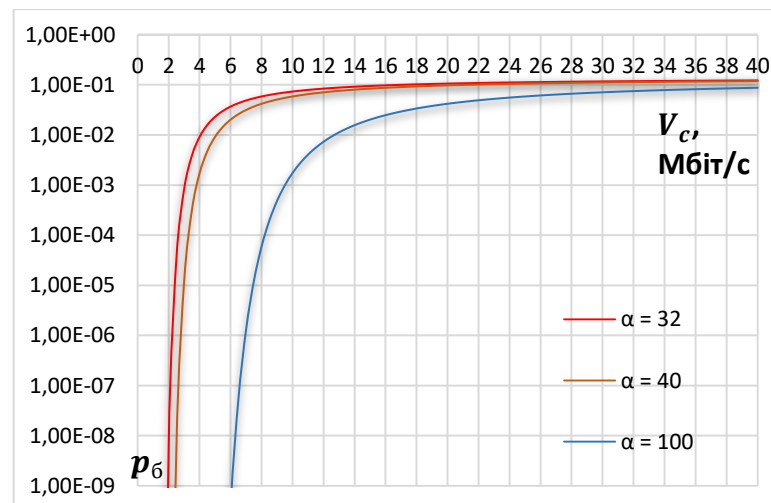


Рисунок 2.4 – Залежність достовірності передачі від частотного ресурсу

З графіку можна побачити, що при збільшенні частотного ресурсу, тобто каналної швидкості передачі ймовірність помилки на біт зростає, що не є позитивною рисою. Але при цьому аналізуючи графік, варто звернути увагу на характеристику зростання ймовірності помилки. Ця характеристика спочатку дуже різка і дуже сильно впливає на помилку, а з плином часу, все більше збільшення швидкості передачі стає все менше впливати на ймовірність помилки на біт на виході каналу зв'язку. Варто також помітити як впливає енергетичний ресурс. Тобто, підтримуючи ймовірність помилки на біт на виході каналу зв'язку на рівні $P_6 = 10^{-6}$, можливе здійснення передачі інформації з каналною швидкістю приблизною 3 Мбіт/с, при $\alpha = 32,40 [\mu\text{с}^{-1}]$ та швидкістю 7 Мбіт/с при показнику енергетичного ресурсу $\alpha = 100 [\mu\text{с}^{-1}]$. Але завжди потрібно враховувати наскільки доцільне таке збільшення параметрів, щоб результат того вартував. При таких умовах передача по каналу зв'язку може відбуватися без кодування. У свою чергу, недостачу достовірності завжди можна компенсувати застосуванням завадостійкого кодування.

У випадку коли незадовільна швидкість передачі та фіксований ресурс каналу зв'язку, то потрібно звертати увагу на інші методи забезпечення достовірності: вибір відповідного типу модуляції та використання надлишкових коригуючих кодів [35].

2.2 Аналіз впливу типу модуляцій та параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності фіксованих ресурсах каналу зв'язку

2.2.1 Аналіз впливу типу модуляції на параметри передачі системи зв'язку

У попередньому пункті були зроблені висновки, що при фіксованому ресурсі, потрібно використовувати такі методи для забезпечення достовірності: раціональний вибір типу модуляції та використання надлишкових коригуючих кодів [35].

Тому в даному пункті роботи розглянемо вплив цих методів на достовірність передачі.

Розпочнемо аналіз з типу модуляції, оскільки безпосередньо вона впливає на початкову ймовірність помилки – стартові умови для визначення виправних характеристик коду. Та завжди потрібно пам'ятати про вплив модуляції на пропускну здатність каналу зв'язку та продуктивність джерела повідомлень.

Використання багатопозиційної модуляції дозволяє передавати в одному повідомленні дві і більше одиниці, при цьому зростає швидкість передачі у каналі зв'язку.

Спочатку проаналізуємо вплив модуляції на задану достовірність, а саме вплив її кратності на ймовірність помилки на біт. Для цього використаємо формулу 2.6, а значить будемо досліджувати вибір модуляції потрібної кратності використовуючи модуляції типу КАМ-М.

Побудуємо залежність ймовірності помилки на біт від кратності модуляції та проведемо аналіз [39].

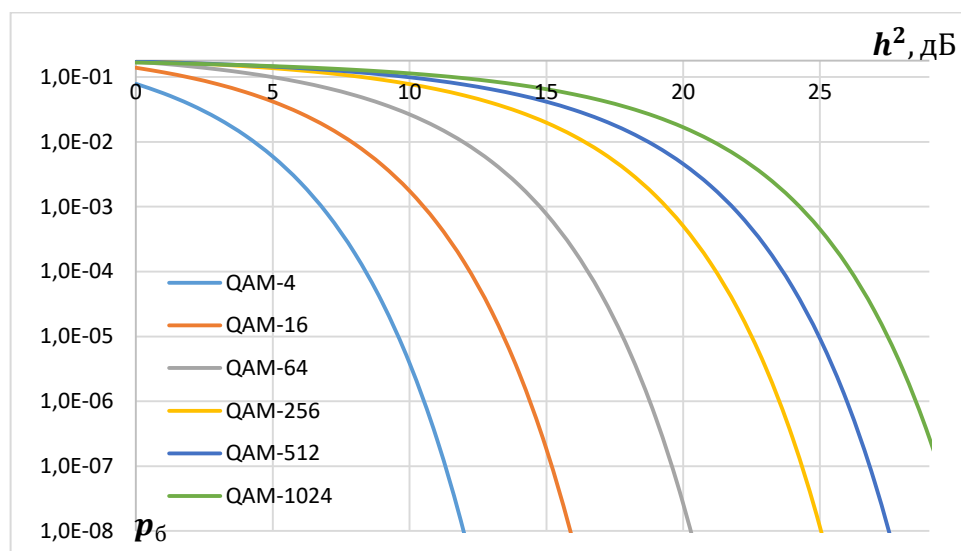


Рисунок 2.5 – Залежність достовірності від кратності модуляції

Проводячи аналіз даної залежності з точки зору фіксованих ресурсів каналу зв'язку, можна помітити, що при однаковому енергетичному ресурсі

модуляція меншої кратності забезпечує вищу достовірність передачі. Так, наприклад, при відношенні сигнал/шум 10 дБ і використанні модуляції кратності 16, ймовірність помилки на виході каналу зв'язку дорівнюватиме $1,75 \cdot 10^{-3}$, а використання модуляції кратності 4 при такому ж відношенні сигнал/шум забезпечить ймовірність помилки $3,87 \cdot 10^{-6}$. Інакше кажучи, при використанні модуляції вищої кратності збільшується кількість сигнальних точок ансамбля сигналів цієї багатопозиційної модуляції, де кожна точка являє собою представлення амплітуди та фази гармонічного коливання, це призводить до ускладнення розрізнення сигнальних точок у приймальному пристрої, оскільки відстань між точками зменшується. У результаті, окрім підвищення швидкості передачі при використанні модуляції вищої кратності зі збільшенням кількості одиниць на символ, що передаються, завадостійкість системи, а саме – достовірність передачі, погіршується [23, 24].

Тобто, зменшуючи кратність модуляції можна добитись необхідної достовірності передачі, навіть, без використання кодування. Але використання більш вищої кратності модуляції забезпечує нам більшу кількість переданої інформації за цей же час. Тому важливо дуже ретельно підходити до вибору типу модуляції, щоб система передачі працювала ефективно.

Інакше кажучи, якщо ефективно обрати тип модуляції, то система буде передавати с певною достовірністю (незадовільною) задовільну кількість інформації. У цьому випадку, щоб повністю задовольнити вимоги споживача щодо достовірності передачі інформації використовують надлишкові (завадостійкі) коди, які мають коригуючі властивості.

Для оцінки впливу модуляції на стартовий параметр – виправну здатність надлишкових кодів будемо використовувати такий інструмент: біноміальну модель генерації помилок у бінарному каналі [40, с. 62-63]:

$$P \leq \sum_{j=t+1}^n C_n^j \cdot p_6^j \cdot (1 - p_6)^{n-j}, \quad (2.7)$$

За допомогою цієї моделі можна знайти виправну здатність коду t , яка забезпечить відповідну задану достовірність $P = 10^{-6}$ (ймовірність помилки на біт на виході декодера) використовуючи початкову ймовірність бітової помилки на виході каналу зв'язку, яка визначається типом модуляції.

Побудуємо графік залежності виправної здатності коду від відношення стартової ймовірності помилки до заданої (кількість разів $k = \frac{p_0}{P}$), взявши для прикладу код довжиною у 200 символів та фіксує енергетичний параметр на рівні 10 дБ:

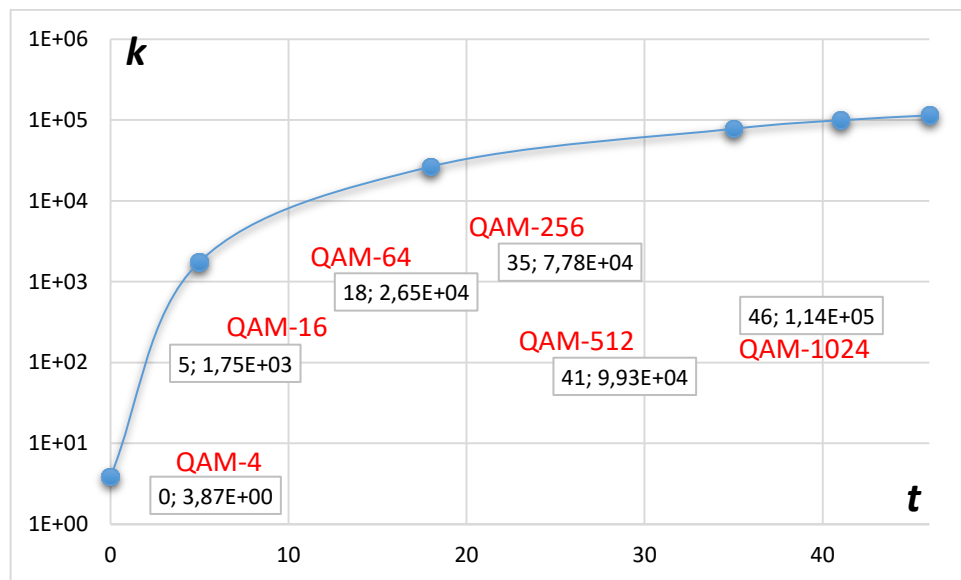


Рисунок 2.6 – Вплив модуляції на стартову умову для виправної характеристики коду

Звертаючи увагу на рисунок 2.5, можна побачити, що при фіксованому ресурсі використання модуляції більшої кратності призводить до погіршення ймовірності помилки, а це у свою чергу, означає що відношення стартової ймовірності помилки до заданої (k) зростає (рис. 2.6). На рисунку 2.6 можна побачити, що при фіксованому енергетичному ресурсі та обраній довжині коду, модуляція вищої кратності потребує, щоб цей код володів більшою виправною здатністю, на відміну від модуляції меншої кратності.

Також модуляція впливає на пропускну здатність та продуктивність. При роботі з продуктивністю, обов'язково потрібно згадати пропускну здатність, оскільки – це та границя до наближення якої потрібно прагнути [15, 40]:

$$C = V_C \left(\log_2 M + p_{\text{сим}} \log_2 \frac{p_{\text{сим}}}{M-1} + (1 - p_{\text{сим}}) \log_2 (1 - p_{\text{сим}}) \right), \quad (2.8)$$

$$R = V_C \cdot \log_2 M \cdot (1 + p_{\text{біт}} \log_2 p_{\text{біт}} + (1 - p_{\text{біт}}) \log_2 (1 - p_{\text{біт}})), \quad (2.9)$$

Формула 2.9 описує продуктивність джерела повідомлень без кодування. Нехай канална швидкість передачі дорівнює 1 Мбіт/с, побудуємо графік, який описує вплив модуляції на пропускну здатність та продуктивність:

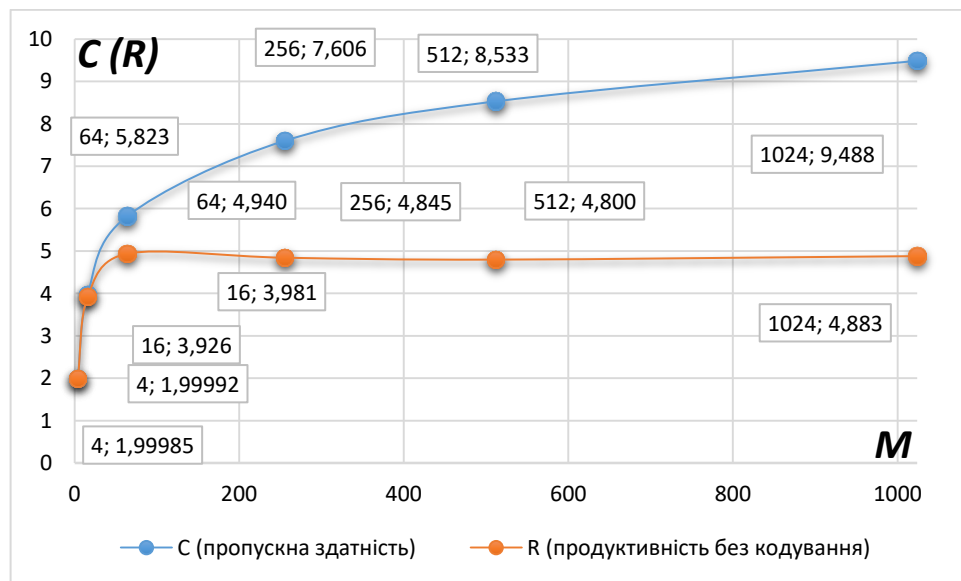


Рисунок 2.7 – Вплив кратності модуляції на пропускну здатність та продуктивність

Аналізуючи рисунок 2.7, можна помітити, що на відміну від пропускну здатності, продуктивність джерела повідомлень має екстремум та починає спадати, оскільки в деякий момент ймовірність помилки настільки

погіршується, що переважає швидкість росту за рахунок збільшення кратності модуляції.

2.2.2 Аналіз впливу параметрів надлишкових кодів на параметри передачі системи зв'язку

У попередньому пункті було продемонстровано зв'язок між типом модуляції та стартовим параметром надлишкових кодів – виправною здатністю. Тепер потрібно провести аналіз усіх параметрів завадостійких кодів та їх вплив на задану достовірність та продуктивність джерела повідомлень. Для цього будемо використовувати такі інструменти:

- зв'язок виправної здатності коду з відстанню по Хеммінгу:

$$d \geq 2t + 1, \quad (2.10)$$

- методику аналізу завадостійких можливостей блокових кодів:

$$r_c = \frac{k}{n} = \frac{n - 2d + 2 + \log_2(d)}{n}, \quad (2.11)$$

За границею Плоткіна можливо знайти найкращі за можливостями коди, оскільки вона визначає максимальну інформаційну ефективність [42, 43].

$$r_c \leq \frac{k}{n} \leq 1 - \frac{\log_2 \sum_{i=0}^{d-2} C_{n-1}^i}{n}, \quad (2.12)$$

Границя Варшмова-Гільберта визначає реально існуючі коди (наприклад, БЧХ). Тобто ця границя гарантує існування коду [42, 43].

Для цього аналізу побудуємо залежність виправної здатності коду від енергетичного ресурсу (2.7), тобто від ймовірності помилки (рис. 2.2, рис. 2.3) на виході каналу зв'язку (для прикладу виберемо $n = 200, 500, 1000$):

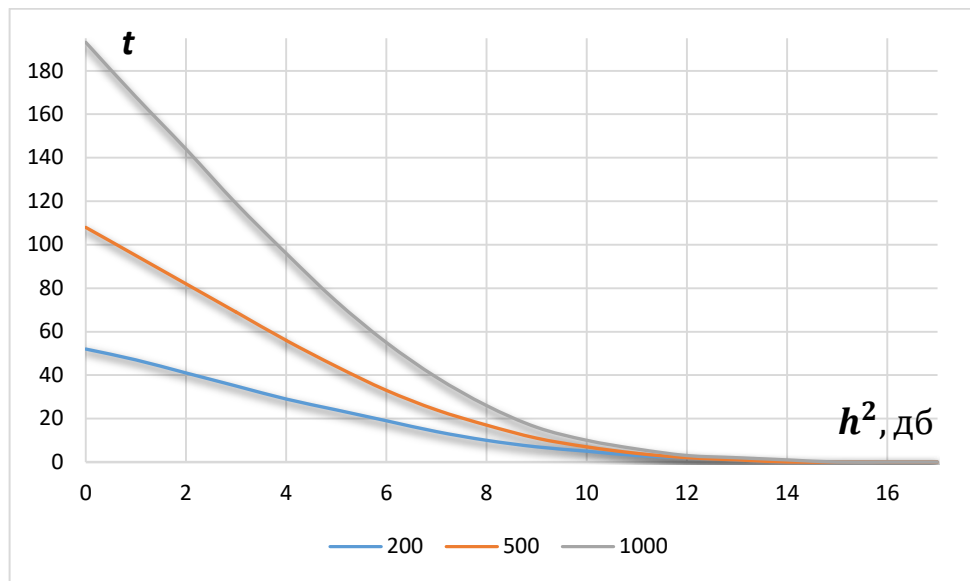


Рисунок 2.8 – Залежність виправної здатності коду від енергетичного ресурсу

Виконавши аналіз залежностей при різних параметрів на рисунку 2.4, варто відмітити головну властивість – при збільшенні довжини блоку коду, виправна здатність цього коду також буде зростати. Тобто, наприклад, при енергетичному ресурсі $h^2 = 4$ дБ, при використанні кодів довжиною блоку $n = 200, 500, 1000$, їх виправна здатність буде відповідно $t = 29, 56, 96$ щоб забезпечити бітову ймовірність помилки на виході декодера на рівні $P = 10^{-6}$. Якщо ж потрібно забезпечити меншу достовірність, то звісно й виправну здатність коду можна зменшити. Тобто вибравши певну довжину блоку коду можна завжди знайти яку він виправну здатність повинен мати, щоб забезпечити задану достовірність.

При цьому, потрібно не забувати про методику аналізу завадостійких можливостей блокових кодів, оскільки саме вона визначає – чи може такий код існувати, та які найкращі параметри цього коду можуть бути. Для прикладу якщо обрати при тих же самих енергетичних параметрах $h^2 = 4$ дБ довжину блоку коду $n = 10$, то для забезпечення необхідної достовірності виправна здатність коду має бути $t = 5$. І якщо після визначення виправної здатності проаналізувати чи існує даний код за границями Плоткіна та

Варшамова-Гільберта, то можна побачити, що даного коду не існує. Інакше кажучи, не існує коду довжиною блоку $n = 10$ який може забезпечити необхідну достовірність передачі інформації з урахуванням поставлених вимог.

Тепер побудуємо, використовуючи формулу 2.10 графік залежності відстані по Хеммінгу (одразу поділивши на $2n$, оскільки тоді надалі буде зручно будувати Границі Плоткіна та Варшамова-Гільберта [42, 43], щоб оцінити реальні та найкращі характеристики коду) від енергетичного ресурсу при тих же самих параметрах довжини блоку коду:

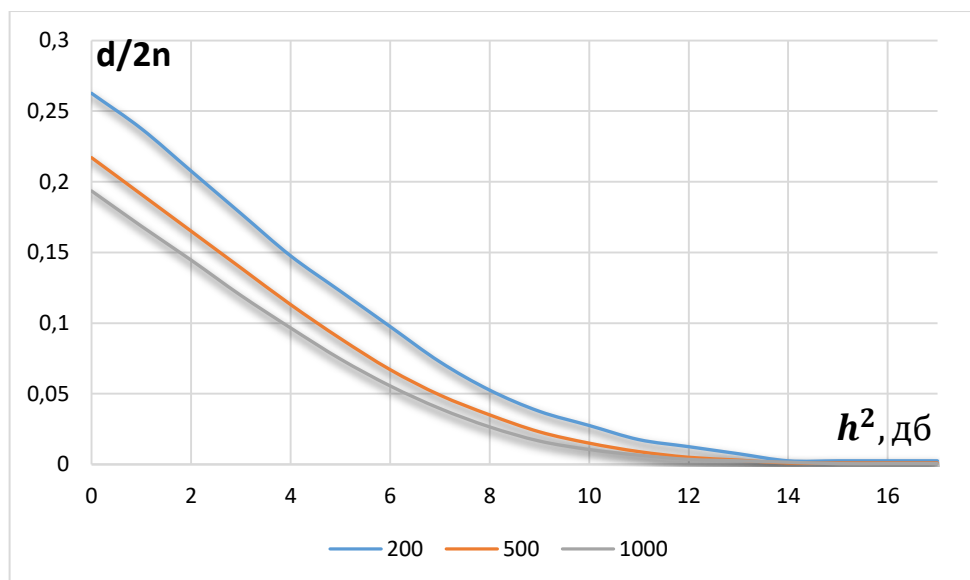


Рисунок 2.9 – Залежність відстані по Хеммінгу від енергетичного ресурсу

Розглянувши рисунок 2.9, можна побачити, що використання коду з меншим параметром довжини блоку коду призводить до збільшення параметру нормованої відстані по Хеммінгу. Щоб зрозуміти, позитивна чи негативна ця властивість потрібно використавши формули 2.11-2.12 побудувати залежності швидкості кодування від відстані по Хеммінгу. Для цього залишимо параметр довжини блоку коду $n = 200$, оскільки дані границі мають властивість змінюватись відносно вибору цього параметру.

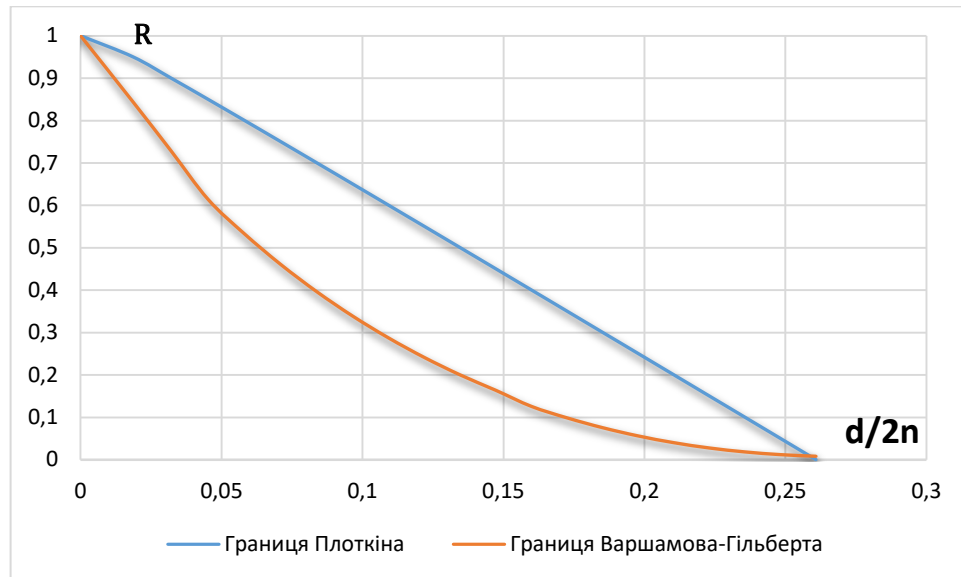


Рисунок 2.10 – Залежність швидкості коду від нормованої відстані по Хеммінгу

При збільшенні нормованого значення відстані по Хеммінгу швидкість коду зменшується. Це, у свою чергу означає, що код відбирає більше ресурсу на передачу не корисної інформації. Для аналізу та оцінки цього, використаємо формулу 2.8 та трошки модернізуємо формулу 2.9, щоб отримати продуктивність джерела повідомлень з кодуванням. Вплив модуляції та параметрів блокових кодів на продуктивність відбувається таким чином [11]:

$$R = V_c \cdot \log_2 M \cdot r_c \cdot (1 + p_{\text{bit}} \log_2 p_{\text{bit}} + (1 - p_{\text{bit}}) \log_2 (1 - p_{\text{bit}})), \quad (2.13)$$

де: $r_c = \frac{k}{n}$ – швидкість коду, яка дорівнює відношенню інформаційних символів джерела повідомлення к довжині блоку коду.

Нормуючи формули 2.8 та 2.13, побудуємо залежності продуктивності з кодуванням при використанні кодів з найкращою інформаційною ефективністю (Границя Плоткіна) та реально існуючих кодів (Границя Варшамова-Гільберта). При цьому також важливо побудувати нормовану пропускну здатність, оскільки вона не залежить від параметрів кодування,

але потрібно завжди намагатися наблизитись до неї, тому що вона визначає максимальні можливості системи передачі.

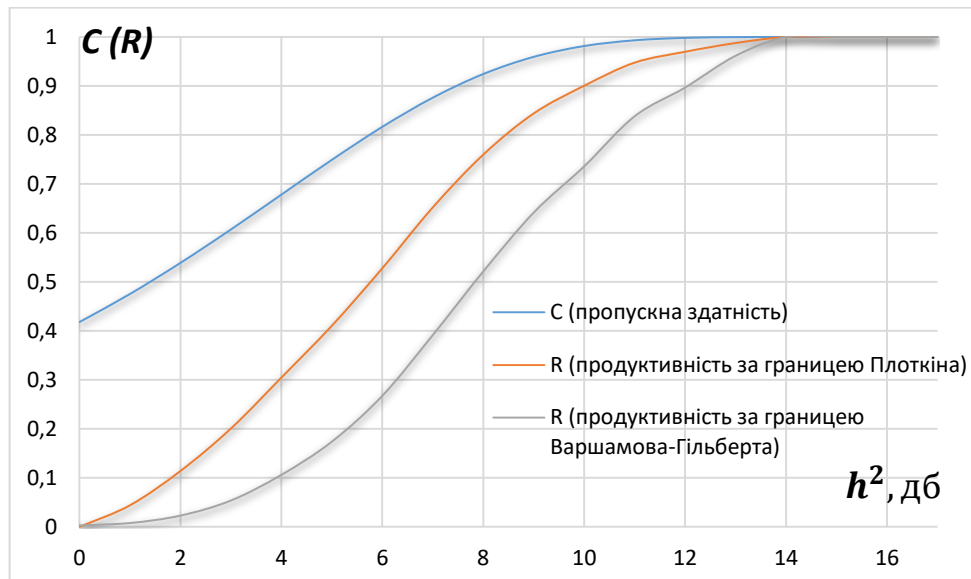


Рисунок 2.11 – Вплив параметрів коду на продуктивність джерела повідомлення

Якщо проаналізувати рисунок 2.11, можна одразу зробити висновок, що при гарному відношенні сигнал/шум можливо досягти продуктивності джерела повідомлення близької до пропускної здатності каналу зв'язку. Це у першу чергу пов'язано з вибором типу модуляції (рис. 2.5), оскільки при великому відношенні сигнал/шум можливо обрати такий тип модуляції, який забезпечить передачу інформації з необхідною якістю, навіть, без кодування. Але при цьому втрачається ефективність, оскільки можливо при використанні модуляції вищої кратності передавати більшу кількість інформації, но в даному випадку починаємо розплачуватися за це, достовірністю передачі, а саме ймовірністю помилки.

Для одночасного підняття кратності модуляції та утримання необхідної достовірності використовуємо надлишкові завадостійкі коди. В залежності від відмінності ймовірностей помилок (початкова, при вборі модуляції та задана умовою), код матиме різну виправну здатність. Тобто, чим відмінність

більша тим більшу виправну здатність повинен мати надлишковий код, і ця залежність справедлива при будь-якому параметрі довжини блоку коду.

Але завжди потрібно пам'ятати, що окрім достовірності потрібно ефективно передавати інформацію з погляду її кількості, а це, у свою чергу, значить, що потрібно домогтись того, щоб швидкість коду була якомога більшою. Тобто якомога менша частина наявного ресурсу відводилась на передачу не корисної інформації. Домогтись цього можливо за допомогою збільшення довжини блоку коду, тобто чим більша ця довжина тим більша швидкість кодування.

2.2.3 Граничне значення блоку кодів Хеммінга при заданих вимогах до достовірності прийому

У використанні коду с великою довжиною блоку є також і свої мінуси. Щоб розібрати мінуси звернемо увагу на одні із найвідоміших кодів на даний момент.

Найбільш відомий з перших коригуючих кодів – код Хемінга, який здатний виправляти одиничну помилку та знаходити подвійну не залежно від довжини блоку коду. Коди Хемінга є досконалими, тобто за своєю структурою співпадаючими з границею Хемінга [13].

Відповідно до корегуючих здатностей, коди Хемінга мають фіксовані параметри відстані Хемінга d , кількості виправлених помилок t та кількості виявлених помилок s : ($d = 3; t = 1; s = 2$) – незалежно від довжини блоку n .

Позитивна риса кодів Хемінга полягає в тому, що при рості числа символів у блоці n , зростає швидкість кодування R (табл. 2.1; рис. 2.7):

Таблиця 2.1 – Швидкість кодів Хемінга

Код Хемінга (n, k) $d_{min} = 3$	$R = k/n$
(7,4)	0,571
(15,11)	0,733
(31,26)	0,839
(63,57)	0,905
(127,120)	0,945
(255,247)	0,969
(511,502)	0,982
(1023,1013)	0,990

Отже, частка інформаційних символів k в суцільному блоці із n символів зростає.

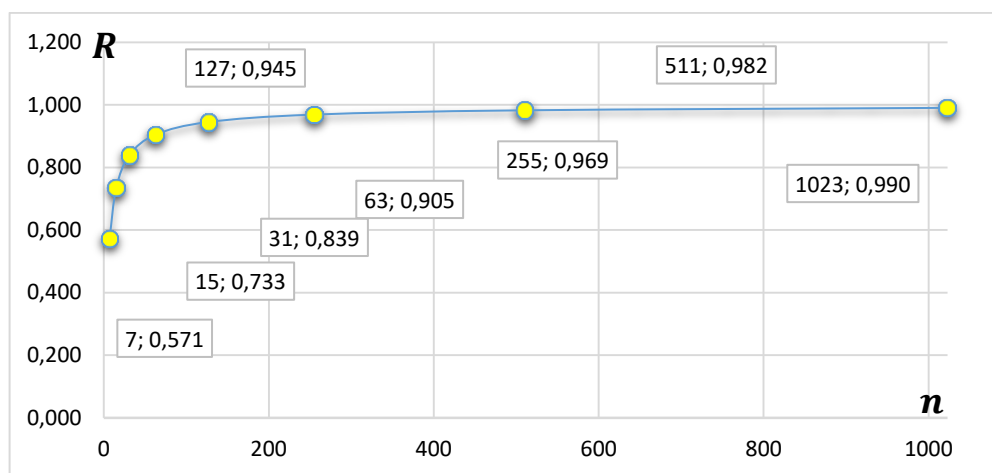


Рисунок 2.12 – Залежність швидкості коду від довжини блоку

Проте, при цьому потрібно враховувати, що при збільшенні числа символів у блоці може збільшитись кількість помилок, які попадуть у цей блок, а виправна здатність коду Хемінга стала ($t = 1$).

Отже, потрібно з'ясувати динаміки обох процесів при зростанні довжини блоку n : зростання швидкості кодування R та зростання уразливості відповідного блоку – при сталій енергетиці каналу зв'язку.

Нехай задані вимоги до достовірності прийому символів джерела на вході пристрою одержувача: $P = 10^{-6}$. Розглянемо, якою має бути ймовірність помилки на символ на виході каналу зв'язку $p_{\text{ош}}$, в залежності від довжини блоку коду n , щоб досягнути потрібної достовірності після корегування за рахунок виправлення t помилок у блоці довжиною n . Для цього використаємо рівняння для вірогідності $p(m, n)$ виникнення t помилок у блоці довжиною n через біноміальний розподіл (2.15) [13, 40], та властивість нормування (2.14):

$$\sum_{m=0}^n p(m, n) = 1, \quad (2.14)$$

$$P \leq \sum_{m=t+1}^n p(m, n), \quad (2.15)$$

Формула 2.15 визначає ймовірність P помилкового прийому кодового слова на виході декодера, яку декодер виправити не може і яка являє собою суму ймовірностей виникнення $t + 1, t + 2, \dots, n$ помилок. Тоді, щоб знайти ймовірність правильного прийому, наприклад, для коду (7,4), переробимо біноміальний розподіл, який використовували вище, а саме границю ймовірності правильного прийому $P_{\text{пп}}$ [14, 40]:

$$P_{\text{пп}} = \sum_{m=0}^{t+1} C_n^m p_{\text{ош}}^m (1 - p_{\text{ош}})^{n-m} = C_7^0 p_{\text{ош}}^0 (1 - p_{\text{ош}})^{7-0} + C_7^1 p_{\text{ош}}^1 (1 - p_{\text{ош}})^{7-1} = 1 - 10^{-6}, \quad (2.16)$$

Вирішивши дане рівняння (2.16), отримуємо значення ймовірності помилки на символ на виході каналу $p_{\text{ош}} = 2,18 \cdot 10^{-4}$. Виконавши дану процедуру для інших кодів Хемінга занесемо дані у таблицю (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – Ймовірність помилкового прийому

Код Хемінга (n, k) $d_{\min} = 3$	$p_{\text{ош}}$
(7,4)	$2,18 \cdot 10^{-4}$
(15,11)	$9,76 \cdot 10^{-5}$

Продовження таблиці 2.2

Код Хемінга (n, k) $d_{min} = 3$	$p_{ош}$
(31,26)	$4,64 \cdot 10^{-5}$
(63,57)	$2,26 \cdot 10^{-5}$
(127,120)	$1,12 \cdot 10^{-5}$
(255,247)	$5,56 \cdot 10^{-6}$
(511,502)	$2,77 \cdot 10^{-6}$
(1023,1013)	$1,38 \cdot 10^{-6}$

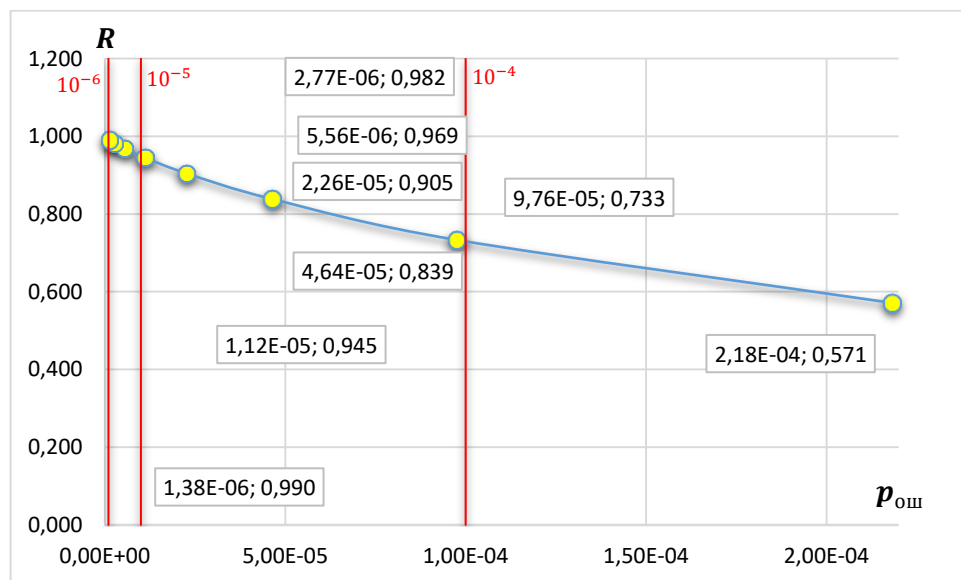


Рисунок 2.13 – Залежність ймовірності помилкового прийому від швидкості коду

Результати аналізу впливу довжини параметру коду на забезпечення необхідної достовірності на прикладі коду Хеммінга (рис. 2.13) показали, що:

- досконалий код Хемінга втрачає корисні корегуючі властивості з ростом довжини блоку n , тому що його виправна здатність не змінюється, а кількість виникаючих помилок при цьому зростає;
- в даному випадку доречно використовувати коди Хемінга до граничного значення довжини блоку коду 1023, опираючись на задані

вимоги, оскільки подальше збільшення довжини блоку вже не має сенсу, тому що задана достовірність має місце й без кодування.

Варто підвести підсумки щодо впливу параметрів надлишкових кодів на забезпечення заданої достовірності:

- головними вимогами для знаходження параметрів надлишкових кодів є визначення початкової ймовірності помилки в каналі зв'язку, яка характеризується типом використаної модуляції, та обрана довжина блоку коду;
- чим краща початкова ймовірність помилки в каналі зв'язку, тим меншою виправною здатністю повинен володіти код;
- використовуючи біноміальний розподіл можливо завжди знайти виправну здатність цього коду, яка забезпечить необхідну достовірність передачі, але це не означає, що такий код існує;
- використовуючи методику аналізу завадостійких можливостей блоку коду та знайдену виправну здатність, можливо остаточно вирішити питання стосовно існування реального такого коду (Границя Варшамова-Гільберта), чи параметрів найкращого коду з такою виправною здатністю (Границя Плоткіна);
- оскільки довжина блоку коду обирається стосовно можливостей системи зв'язку, а саме людиною, то це означає що завжди можна знайти такі параметри надлишкового коду, які забезпечать необхідну якість зв'язку;
- при збільшенні довжини блоку, його виправна здатність, яка може забезпечити необхідну достовірність, також бути зростати, але потрібно пам'ятати, що кількість помилок які можуть потрапити у цей блок також буде зростати, тому даний параметр потрібно обирати розумно, а не якомога більший.

Тобто, можна зробити висновки, що при виборі типу модуляції та параметрів надлишкових кодів для забезпечення необхідної достовірності варто пам'ятати їх взаємозалежність, як параметрів системи зв'язку.

Інакше кажучи, взаємозв'язки параметрів модуляції та надлишкових кодів можна об'єднати в одну методику. Ця методика буде визначати, який саме параметр від якого залежить, та у якому порядку, крок за кроком, визначати їх, щоб забезпечити необхідну достовірність передачі інформації.

2.3 Аналіз методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду при фіксованих ресурсах каналу зв'язку

Розглядаючи попередні пункти, можна було побачити, що при забезпеченні заданої достовірності потрібно раціонально обирати тип модуляції та параметр блоку коду.

Тому будуючи графіки відповідних взаємозалежних параметрів системи зв'язку розглянутих у пункті 2.2.2, створимо графічне представлення методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду, коли ресурси каналу зв'язку є фіксованими (рис. А.1). Усі взаємозв'язки описаних вище інструментів для забезпечення заданої достовірності, такі як біноміальний розподіл (2.7) [40, с. 62-63] та методика аналізу можливостей завадостійких кодів (2.11-2.12) [31], на рисунку А.1 об'єднані в одну цілісну структуру, за якою покроково можна знайти усі параметри системи зв'язку, які будуть забезпечувати необхідну якість передачі інформації.

При виборі типу модуляції потрібно враховувати її вплив на продуктивність та стартовий параметр для визначення параметрів надлишкових кодів. Тобто, аналізуючи рисунки 2.6-2.7, зрозуміло, що, навіть, використання модуляції кратності 1024 для передачі більшої кількості інформації, не забезпечить різке зростання продуктивності. Оскільки без

кодування, швидкість зростання ймовірності помилки при цьому буде переважати швидкість зростання показника кратності модуляції. Звісно в даному випадку мова про забезпечення необхідної достовірності взагалі не йде. Щоб забезпечити якість, потрібно використати кодування, але звертаючи увагу на рисунок 2.6, можна побачити, що для забезпечення необхідної достовірності виправна здатність коду повинна бути вища, ніж була б при використанні модуляції нижчою кратності. Та тепер розглядаючи рисунок А.1, можна одразу побачити, що при вищій виправній здатності також вища й відстань по Хеммінгу, а це у свою чергу означає, що швидкість коду буде меншою. Менша швидкість коду означає, що більша кількість ресурсу буде відводитися на передачу не корисної інформації. Але це не означає, що дана модуляція не придатна до використання, варто пам'ятати, що вплив її на достовірність та продуктивність розглядався при фіксованих ресурсах каналу зв'язку, тобто енергетичний показник був обраний $h^2 = 10$ дБ. Даний тип модуляції доцільно використовувати, якщо є можливість забезпечити високий енергетичний показник каналу зв'язку (2.2-2.3).

Крім того, незважаючи на те, що аналіз відбувається з точки зору забезпечення відповідної достовірності, все одно в кінці важливо оцінити вплив параметрів модуляції та надлишкових кодів на продуктивність джерела повідомлень.

Після знаходження усіх параметрів надлишкового коду, можна зробити нормування параметрів продуктивності та пропускну здатності, щоб адекватно оцінити вплив знайденого коду. Приклад такого графіку представлений з самого верху на рисунку А.1.

Для проведення аналізу потрібно задатися початковими значеннями. В цьому випадку виберемо два типи модуляції (КАМ-4 та КАМ-16 оскільки енергетика каналу зв'язку буде обрана невелика) та дві довжини блоку коду ($n = 200, 500$). Нехай енергетичний параметр каналу зв'язку буде фіксований і дорівнюватиме $h^2 = 8$ дБ. Забезпечити достовірність треба на рівні $P = 10^{-6}$.

Даний аналіз буде проводитись покроково по графічному представленню на рисунку А.1.

Першим кроком є вибір типу модуляції, оскільки саме вона впливає на бітову ймовірність помилки на виході каналу зв'язку. Якщо саме вона нас не влаштовує, то за допомогою коду можливо досягти потрібної достовірності. За формулою 2.6 можливо одразу визначити ймовірність помилки для обох видів модуляції. При даній енергетиці каналу краща ймовірність буде досягатись модуляцією типу КАМ-4 – $p_6 = 1,91 \cdot 10^{-4}$, а при КАМ-16 – $p_6 = 9,25 \cdot 10^{-3}$, оскільки для досягнення такого ж результату як КАМ-4, потрібна більша енергетика каналу зв'язку, а в початкових умовах сказано, що вона фіксована.

Наступною дією буде знаходження виправної здатності надлишкового коду (2.7). Одразу варто відмітити, що модуляція впливає на цей параметр прямо. Виражається це тим, що при однаковій довжині блоку коду при різних модуляціях, виправна здатність модуляції з гіршим показником ймовірності помилки потребує більшої виправної здатності. Так при використанні коду довжиною 200 символів та модуляції КАМ-4, для забезпечення заданої достовірності необхідно мати код з виправною здатністю 2 символи, а при зміні модуляції на КАМ-16 потрібно мати код з виправною здатністю 10 символів.

Тепер потрібно визначити швидкість надлишкового коду. Для цього використовуючи рівняння 2.10 спочатку знаходимо параметр відстані по Хеммінгу, після чого користуючись формулами 2.11-2.12 знаходимо реальну (Границя Варшимова-Гільберта) та найкращу (Границя Плоткіна) швидкість коду [42, 43]. При даних умовах швидкість завадостійкого коду (реальна та найкраща) при використанні модуляції типу КАМ-4 є вищою за швидкість при використанні модуляції типу КАМ-16. Це означає, що кодування при використанні модуляції КАМ-4 відбирає меншу кількість ресурсу на передачу некорисної інформації. Але подібного результату можливо домогтись, якщо при модуляції КАМ-16 використовувати код, який має довжину блоку

більше за 200 символів, оскільки при збільшенні блоку коду швидкість кодування зростає.

Наприкінці за формулами 2.8, 2.13 можливо виконати нормування значень пропускну здатності та продуктивності при цьому оцінивши вплив визначеного параметру коду на ці головні характеристики передачі інформації.

Результати покрокового визначення параметрів модуляції та надлишкового коду, які забезпечать відповідну достовірність системи зв'язку занесемо у зведену таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Приклад залежності параметрів модуляції та надлишкових кодів для забезпечення заданої достовірності при фіксованому енергетичному ресурсі ($h^2 = 8$ дБ)

Тип модуляції	p_6	Довжина блоку коду, n	Виправна здатність, t	$d/2n$	Швидкість кодування, r_c	
					Границя Плоткіна	Границя Варшимова-Гільберта
QAM-4	$1,91 \cdot 10^{-4}$	200	2	0,0125	0,97161	0,898375
		500	3	0,007	0,981615	0,924214
QAM-16	$9,25 \cdot 10^{-3}$	200	10	0,0525	0,821962	0,563904
		500	17	0,035	0,874259	0,656775

Використовуючи дану методику можна завжди обрати відповідну модуляцію та знайти параметри надлишкового коду, які повністю будуть задовольняти вимоги надання високоякісного зв'язку при фіксованому ресурсі каналу зв'язку. Але при цьому методика є універсальним інструментом, навіть при зміні ресурсу за нею можливо знайти всі необхідні параметри як і модуляції, так і надлишкових кодів. Варто лише пам'ятати про взаємозв'язок ресурсів зв'язку – частотного та енергетичного (2.3-2.4), в іншому ж методика за кроками залишиться незмінною.

Саме тому ця методика буде використовуватися і надалі, для вирішення проблем та поставлених задач, щодо надання високоякісного зв'язку за умов сталості продуктивності або швидкості джерела повідомлень при використанні додаткового ресурсу.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Частотний та енергетичний ресурс системи зв'язку обернено пропорційно пов'язані через інтегральний показник просторово-енергетичних параметрів, а саме через відношення сигнал/шум h^2 . Тому при збільшенні (зменшенні) частотного ресурсу (канальної швидкості передачі) також понижується (зростає) енергетичний показник. Це відбувається за рахунок того, що потужність шуму у каналі зв'язку зростає, а потужність сигналу при цьому залишається сталою.

2. Важливо пам'ятати, що при аналізі декількох модуляцій різної кратності, за гарних енергетичних показників каналу зв'язку, які є фіксованими, можливо обрати модуляцію найменшої кратності, яка при цьому, можливо, задовольнить достовірність передачі інформації, навіть, без використання кодування. Но при цьому знизиться інформаційна ефективність, оскільки кількість інформації, яку можна була передати при використанні модуляції вищої кратності може бути на порядок вище.

3. Тип модуляції характеризується бітовою ймовірністю помилки на виході каналу зв'язку. Чим більша різниця цієї ймовірності від необхідної достовірності передачі, тим більшою виправною здатністю потрібен володіти завадостійкий код, який забезпечить цю необхідну достовірність.

4. Визначення параметрів надлишкового коду, котрий може забезпечити потрібну якість зв'язку, починається з вибору довжини блоку цього коду. Чим більша ця довжина, тим більша виправна здатність та швидкість цього коду. Але завжди потрібно пам'ятати, що при збільшенні

довжини блоку коду ймовірність потрапляння більшої кількості помилок у цей блок – зростає.

5. Аналіз методики забезпечення необхідної достовірності передачі інформації при фіксованому ресурсі за допомогою вибору типу модуляції та параметрів надлишкових кодів (довжини блоку коду) показав, що використовуючи інструменти, представлені в цьому методі, завжди, незважаючи ні на що, можливо обрати такий тип модуляції, та якщо потрібно (у більшості випадків) знайти параметри надлишкового коду, які забезпечать потрібну якість зв'язку. Окрім цього, дана методика є універсальною, оскільки використовуючи її можливо вирішувати проблеми та поставлені задачі, вимоги яких можуть відрізнятись.

6. Потрібно використовуючи методику забезпечення заданої достовірності при фіксованих ресурсах, яка була розглянута в цьому розділі, сформулювати рекомендації щодо методики синтезу блокових кодів, які забезпечують незмінність продуктивності та швидкості джерела повідомлень.

3 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ЗА УМОВ СТАЛОЇ ШВИДКОСТІ ДЖЕРЕЛА ПОВІДОМЛЕНЬ

3.1 Способи вирішення проблеми надання високоякісного зв'язку за умов сталої продуктивності джерела з використанням додаткового частотного ресурсу

Якщо розглядати можливості операторів зв'язку, які надають високоякісні послуги зв'язку, можна побачити, що дуже часто ці можливості обмежені. Інколи технології розвиваються настільки швидко, що оператор не встигає замінити обладнання на нове, або не повністю замінює. Це призводить до того, що потрібно раціонально використовувати свої ресурси: можливості обладнання, та ресурси каналу зв'язку, які можна забезпечити.

З чого виникає проблема розподілу своїх ресурсів та можливостей, щоб надати високоякісний зв'язок при обмежених умовах. В даному пункті розглядаються умови, при яких продуктивність джерела стала, але при цьому використовується додатковий частотний ресурс.

Головною темою дослідження є продуктивність (2.9, 2.13) [11], а вона у свою чергу тісно пов'язана з пропускною здатністю (2.8) [15, 40], оскільки саме друга показує деякий граничний показник швидкості передачі інформації по каналу зв'язку.

Тобто, при використанні додаткового частотного ресурсу, в нас збільшується швидкість передачі у дискретному каналі зв'язку. Щоб в даному випадку вирішити проблему надання високоякісного зв'язку, тобто забезпечити задану достовірність та при цьому залишити продуктивність джерела незмінною, можна скористатися надлишковими кодами.

Тобто головною задачею цього метода являється визначення параметру надлишкового коду [36-38], за якого буде виконуватись умова надання високоякісного зв'язку, а саме підтримання достовірності передавання біт на виході декодера надлишкового кодування на рівні $P = 10^{-6}$ та сталої продуктивності джерела.

Для вирішення проблеми, яка розглядається в цьому пункті будемо використовувати інструменти, які складають узагальнену методику забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів надлишкових кодів [40-43].

Найголовнішим стартовим параметром для розрахунку всіх подальших параметрів виявляється довжина блоку коду, через те що, даний параметр обирає людина і він обмежений лише існуючими кодами на даний момент.

Тепер розглянемо вирішення даної проблеми на прикладі. Для цього виберемо початкові параметри: модуляція – КАМ – 16, $\alpha = 32 [\mu\text{с}]^{-1}$, $V_C = 4$ Мбіт/с, задана достовірність $P = 10^{-6}$. Використовуючи додатковий частотний ресурс підвищимо швидкість передачі у дискретному каналі зв'язку до $V_C = 8$ Мбіт/с.

Спочатку визначимо пропускну здатність та продуктивність без кодування для обох швидкостей в каналі зв'язку за формулами 2.8 та 2.9 та нанесемо їх на графік:

$$C_1 = 4 \left(\log_2 16 + 0,00052 \cdot \log_2 \frac{0,00052}{16-1} + (1 - 0,00052) \cdot \log_2 (1 - 0,00052) \right) = 15,97 \text{ Мбіт/с};$$

$$C_2 = 8 \left(\log_2 16 + 0,01712 \cdot \log_2 \frac{0,01712}{16-1} + (1 - 0,01712) \cdot \log_2 (1 - 0,01712) \right) = 30,47 \text{ Мбіт/с};$$

$$R_1 = 4 \cdot 4 \cdot (1 + 0,00925 \cdot \log_2 (0,00925) + (1 - 0,00925) \log_2 (1 - 0,00925)) = 14,79 \text{ Мбіт/с};$$

$$R_2 = 8 \cdot 4 \cdot (1 + 0,0586 \cdot \log_2 (0,0586) + (1 - 0,0586) \cdot \log_2 (1 - 0,0586)) = 21,698 \text{ Мбіт/с}.$$

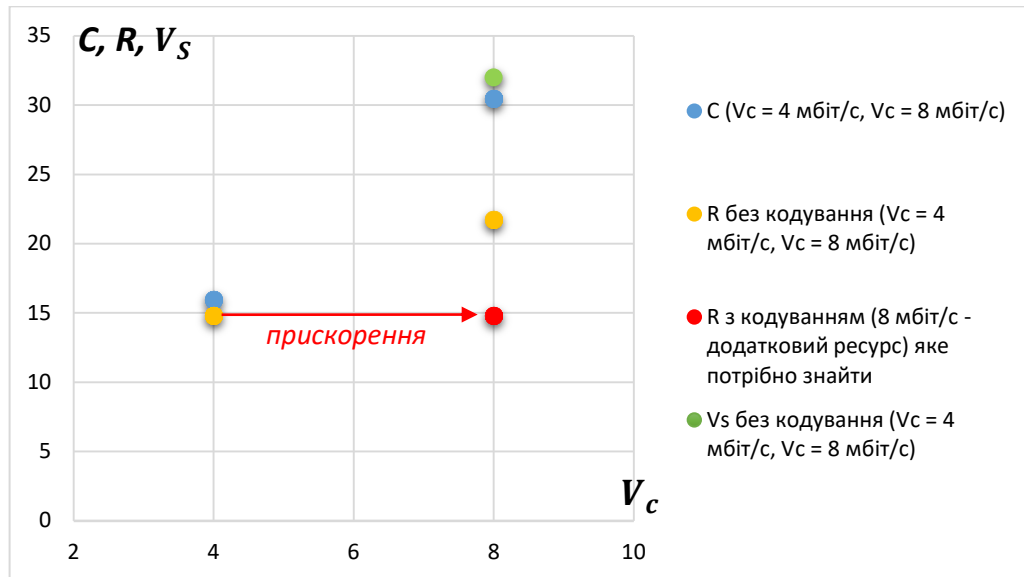


Рисунок 3.1 – Постановка проблеми у графічному представленні

Можна звернути увагу, що при початковій швидкості джерела $V_s = 16$ Мбіт/с, неможливо без використання кодування забезпечити передавання всіх символів джерела, оскільки пропускна здатність $C = 15,97$ Мбіт/с, а продуктивність джерела дискретних сигналів, у випадку коли завадостійкий ступінь не задіяний $R = 14,79$ Мбіт/с.

Наступним кроком буде знаходження продуктивності з кодуванням використовуючи додатковий ресурс, але при цьому потрібно пам'ятати, що потрібно знайти такі параметри коду, які забезпечать незмінність продуктивності ($R = 14,79$ Мбіт/с) та задану достовірність ($P = 10^{-6}$). Оскільки головним інструментом буде параметр довжини блоку коду, то вирішувати будемо методом ітерації. Для аналізу виберемо коди довжиною блоку – $n = 100 - 1000$ з шагом 100 символів та $n = 1000 - 5000$ з шагом 1000 символів.

Розберемо методику знаходження продуктивності заводозахищених систем та параметрів коду крок за кроком:

а) Визначимо енергетику каналу зв'язку (використовуючи формули 2.2-2.4) [40, с. 38]:

$$h^2 = \frac{\alpha}{V_c} = \frac{32}{8} = 4 \text{ дБ};$$

б) Тепер за типом модуляції, можна знайти ймовірність помилки на виході каналу зв'язку (використовуючи формулу 2.6) [11, 24, 41]:

$$h^2[\text{раз}] = 10^{\frac{h^2[\text{дБ}]}{10}} = 10^{\frac{4}{10}} = 2,512;$$

$$p_6 = \frac{2}{\log_2(16)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{16}}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2(16)}{2 \cdot (16 - 1)} \cdot 2,512} \right) = 0,0586185$$

$$= 5,86 \cdot 10^{-2};$$

с) Отримаємо виправну здатність коду (t) на підставі ітеративної процедури для коду з довжиною блоку $n = 200$ (використовуючи формулу 2.7) [40, с. 62-63]:

$$10^{-6} \leq \sum_{j=t+1}^{200} C_{200}^j \cdot 5,86 \cdot 10^{-2j} \cdot (1 - 5,86 \cdot 10^{-2})^{200-j}$$

Звідси отримаємо, що максимальна виправна здатність $t = 29$, яка задовольняє вимоги до достовірності.

д) Після цього можемо знайти відстань по Хеммінгу (використовуючи формулу 2.10):

$$d = 2 \cdot 29 + 1 = 59$$

е) Залишилось знайти швидкість коду. Тут будемо використовувати саме Границю Плоткіна, оскільки вона характеризує максимально можливу виправну здатність, або інформаційну ефективність (використовуючи формулу 2.12) [42-43]:

$$r_c = \frac{k}{n} = \frac{200 - 2 \cdot 59 + 2 + \log_2(59)}{200} = 0,449413215;$$

f) Було визначено усі параметри для того, щоб знайти продуктивність завадозахищеної системи (використовуючи формулу 2.13) [11]:

$$\begin{aligned} R = 8 \cdot 4 \cdot 0,449413215 \\ \cdot (1 + 5,86 \cdot 10^{-2} \cdot \log_2(5,86 \cdot 10^{-2}) + (1 - 5,86 \cdot 10^{-2}) \\ \cdot \log_2(1 - 5,86 \cdot 10^{-2})) = 9,751 \text{ Мбіт/с.} \end{aligned}$$

Отримавши даний результат, можна зробити висновок, що навіть при використанні кодування, не завжди можливо забезпечити передачу всіх символів джерела.

У зв'язку з головним формулюванням теорії завадостійкості абсолютно достовірна передача сигналів у каналі зв'язку (без помилок) неможлива, оскільки у каналі завжди присутня завада. Отже, відповідно до формули для продуктивності каналу передачі інформації (з теорії інформації), частина інформації втрачається через перешкоди (вирахування з початкової кількості інформації тієї, що пов'язана з перешкодою).

При достовірності порядку 10^{-6} і краще, відповідно до формули для продуктивності каналу передачі інформації (з теорії інформації), та частина інформації, яка втрачається через перешкоди, зневажливо мала.

В даній задачі неможливо досягти передачі усіх символів джерела повідомлення, оскільки для досягнення продуктивності у каналі, близької до продуктивності джерела, висока початкова достовірність, яка досягається виключно енергетичним ресурсом. А в даній задачі енергетичний ресурс ($\alpha = 32 [\mu\text{с}]^{-1}$) фіксується на рівні продуктивності, яку досягли з урахуванням недостатньої енергетики (недостатньої достовірності). Ця продуктивність підтримується за рахунок виключно додаткового частотного ресурсу, необхідного

Саме тому, на початку було обрано для прикладу декілька значень параметру довжини блоку коду.

Проведемо аналогічний розрахунок для інших обраних значень параметру довжини блоку коду та сформуємо таблицю для аналізу отриманих результатів.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку впливу параметрів коду на продуктивність джерела повідомлень

V_c , Мбіт/с	p_6	n	t	r_c	V_s , Мбіт/с	R , Мбіт/с
8	$5,86 \cdot 10^{-2}$	100	19	0,293	9,371	6,354
		200	29	0,449	14,381	9,751
		300	39	0,501	16,032	10,871
		400	48	0,536	17,168	11,641
		500	56	0,566	18,100	12,273
		600	64	0,585	18,721	12,694
		700	73	0,593	18,981	12,870
		800	80	0,609	19,493	13,218
		900	88	0,617	19,750	13,392
		1000	96	0,624	19,955	13,531
		2000	169	0,666	21,318	14,455
		3000	239	0,684	21,898	14,848
		4000	307	0,695	22,250	15,087
		5000	374	0,703	22,487	15,247

Побудуємо для наочності графічно залежність продуктивності з кодуванням від довжини блоку коду.

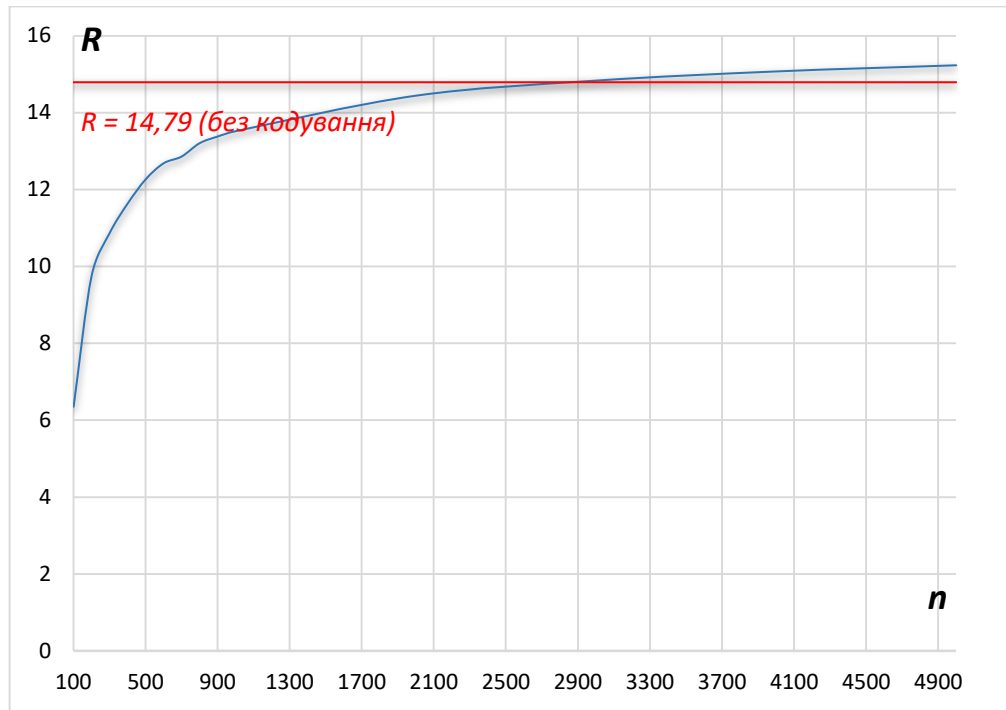


Рисунок 3.2 – Залежність продуктивності від довжини блоку коду

З результатів можна побачити, що по-перше – код, який може забезпечити незмінність продуктивності джерела повідомлень при забезпеченні заданої достовірності має довжину приблизно 2800 символів, саме його и продовжимо шукати, а по-друге, щоб забезпечити передачу всіх символів джерела, потрібно використовувати код довжиною блоку набагато більше за 5000, оскільки тенденція приросту продуктивності не висока.

Повторивши методику розрахунку, методом ітерації можна визначити, щоб вирішити дану проблему потрібно використовувати код, довжина блоку якого становить 2850 символи.

Таблиця 3.2 – Параметри надлишкового коду за допомогою якого вирішується дана проблема ($n = 2850$)

V_c , Мбіт/с	r_c	p_6	V_s , Мбіт/с	R , Мбіт/с
4	–	$9,25 \cdot 10^{-3}$	16	14,787835
8	0,681699	$5,86 \cdot 10^{-2}$	21,81437	14,791536

Якщо звернути увагу на продуктивність, то вона на даний момент трохи збільшилася, а не залишилася сталою. В даному випадку можна знизити швидкість передачі у каналі зв'язку на 3,466 кбіт/с, при цьому параметри коду не зміняться, а продуктивність при цьому відповідатиме з точністю біт/с первинній передачі, без заданої достовірності, тобто залишиться сталою.

Таблиця 3.3 – Результат вирішення проблеми ($n = 2850$)

V_c , Мбіт/с	r_c	p_6	V_s , Мбіт/с	R , Мбіт/с
4	–	$9,25 \cdot 10^{-3}$	16	14,787835
7,996534	0,681699	$5,86 \cdot 10^{-2}$	21,80492	14,787835

Інакше кажучи, виконується передача однакового об'єму інформації, не змінюючи швидкість джерела, но фіксуючи значення первинно досягнутої продуктивності.

При цьому, замість відбору ресурсу джерела для досягнення потрібної достовірності свідомо використовується додатковий частотний ресурс, підтримуючи наявну продуктивність.

Варто відмітити той факт, що при збільшенні довжини блоку для кодування, можна добитися потрібної швидкості джерела при меншій швидкості передачі символів у каналі зв'язку. Звернувши на це увагу зі сторони помилки, можна зрозуміти, чому дана операція буде економічно ефективніше.

3.2 Вирішення задачі забезпечення заданої достовірності без зміни швидкості джерела повідомлень за рахунок додаткового ресурсу

При використанні додатково ресурсу важливо відмітити здатність досягти не тільки незмінної продуктивності джерела повідомлення, але і незмінності швидкості джерела повідомлення. У цьому пункті розглянемо задачу, схожу на проблему, яка описувалась у попередньому пункті. Но на першому місці тепер стоїть не продуктивність джерела повідомлень, а швидкість формування символів джерела. Тобто визначимо швидкість джерела повідомлень без кодування, а потім з використанням додаткового частотного ресурсу визначимо параметри надлишкового коду, який забезпечить необхідну достовірність передачі інформації за умов сталості швидкості джерела повідомлення. Інакше кажучи, збільшимо частотний ресурс, щоб компенсувати ресурс, який використовує кодування на забезпечення заданої достовірності.

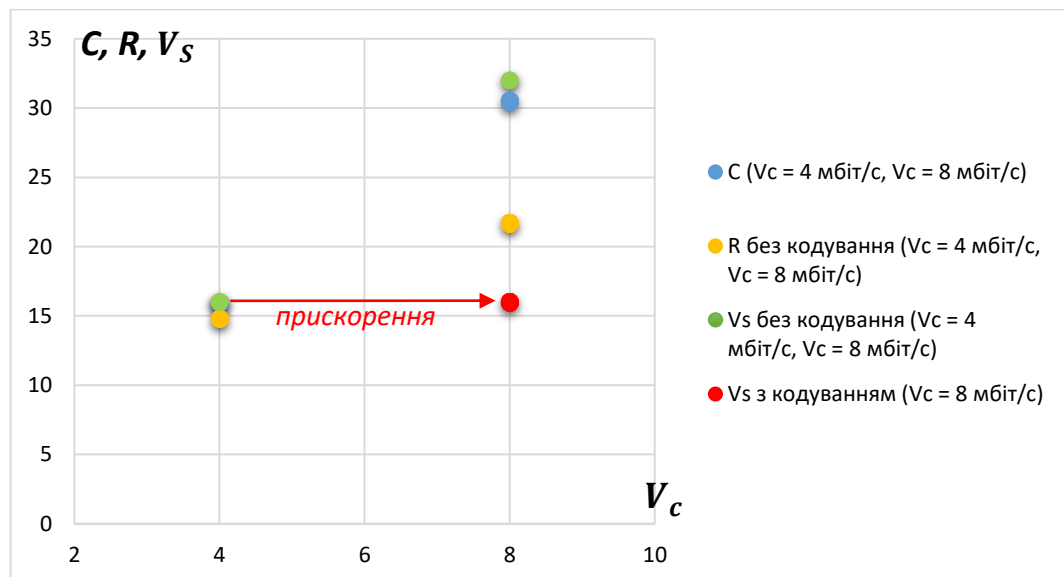


Рисунок 3.3 – Графічне зображення вирішення даної задачі

Інакше кажучи, потрібно, використовуючи інструменти для вирішення подібної проблеми у попередньому пункті, вирішити дану задачу з

забезпечення достовірності, але вже без зміни швидкості джерела повідомлень.

Для вирішення даної задачі візьмемо початкові параметри з попереднього пункту, а саме: модуляція – КАМ – 16, $\alpha = 32 [\mu\text{с}]^{-1}$, $V_C = 4$ мбіт/с, задана достовірність $P = 10^{-6}$. Після чого збільшимо швидкість передачі удвічі, до $V_C = 8$ мбіт/с.

В цьому пункті, використовуючи методику описану в попередньому та таблицю 3.1, одразу побудуємо графічну залежність швидкості формування символів джерела від довжини блоку коду.

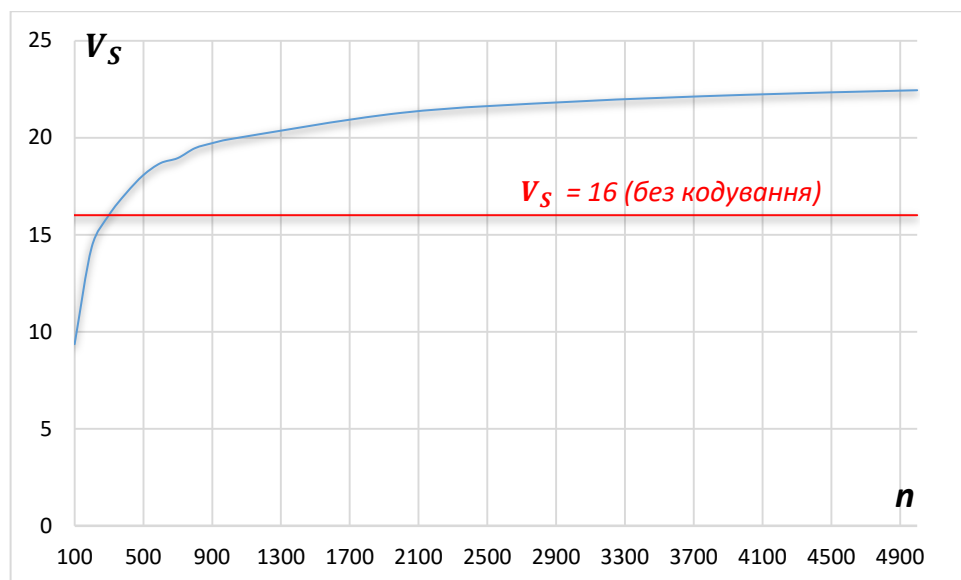


Рисунок 3.4 – Залежність швидкості формування символів джерела від довжини блоку коду

За таблицею 3.1 та графічному зображенню потрібних залежностей можна побачити, що довжина коду яка задовольняє потрібні вимоги становить 300 символів. У зв'язку з цим винесемо потрібні дані до окремої таблиці для опрацювання.

Таблиця 3.4 – Дослідження незмінності швидкості джерела повідомлень при ($n = 300$)

V_c , Мбіт/с	r_c	p_6	V_s , Мбіт/с	R , Мбіт/с
4	–	$9,25 \cdot 10^{-3}$	16	14,787835
8	0,501	$5,86 \cdot 10^{-2}$	16,032403	10,87

Аналізуючи дані у таблиці 3.4, можна побачити, що швидкість джерела повідомлень при використанні коду довжиною у 300 символів відрізняється на 32,403 кбіт/с, а мета цього дослідження домогтись незмінності. Тому скористаємося методикою, яку описували у пункті 3.1, тобто понизимо швидкість в дискретному каналі зв'язку на 16,17 кбіт/с, щоб при цьому не змінились параметри коду, а швидкість джерела повідомлень при цьому відповідатиме з точністю біт/с первинній передачі, без заданої достовірності, тобто залишиться сталою.

Таблиця 3.5 – Результати вирішення даної задачі ($n = 300$)

V_c , Мбіт/с	r_c	p_6	V_s , Мбіт/с	R , Мбіт/с
4	–	$9,25 \cdot 10^{-3}$	16	14,787835
7,98383	0,501	$5,85 \cdot 10^{-2}$	16	10,85

При дослідженні було виявлено, що при використанні додаткового частотного ресурсу та правильному обрані параметру довжини блоку коду можливо вирішити дві проблеми: незмінності продуктивності джерела повідомлення (п. 3.1), чи швидкості джерела повідомлення (п. 3.2). Дані проблеми дуже важливі при проектуванні нової системи передачі інформації, або при модернізації вже існуючої системи передачі.

Оскільки головною проблемою даної роботи було забезпечення необхідної достовірності передачі при незмінності продуктивності джерела, то дана задача була вирішена у пункті 3.1.

В даному пункті було представлено вирішення задачі при незмінності швидкості джерела повідомлення використовуючи методику забезпечення заданої достовірності сформовану з інструментів представлених у другому розділі роботи та графічно представлену на рисунку А.1.

3.3 Оцінка утримання продуктивності при фіксованому енергетичному ресурсі за рахунок частотного ресурсу

При аналізі вирішення задачі забезпечення заданої достовірності у пункті 3.1, важливо провести оцінку утримання сталої продуктивності. В даній задачі важливо було забезпечити дві умови:

- Незмінність продуктивності;
- Забезпечення заданої достовірності.

Потрібно визначити ціну утримання продуктивності при фіксованому енергетичному ресурсі ($\alpha = 32 [\mu\text{с}]^{-1}$) через прискорення, а саме, за рахунок смуги передачі.

Необхідно пов'язати ймовірність помилки з частотним ресурсом. Для цього використаємо коефіцієнт k введений у пункті 2.2.1, варто нагадати, що це відношення початкової ймовірності помилки (незадовільної) до заданої ймовірності помилки, яку необхідно забезпечити. Також введемо аналогічне відношення частотного ресурсу, який потрібно використати, щоб забезпечити задану достовірність, до початкового частотного ресурсу та позначимо його ΔF .

Щоб оцінити результат отриманий у пункті 3.1 зі сторони впливу частотного ресурсу, необхідно провести повторний розрахунок параметрів блокового коду, який може забезпечити необхідну достовірність, але змінивши початкові умови при цьому зафіксувавши параметр блоку коду.

При початкових умовах: КАМ – 16, $\alpha = 32 [\mu\text{с}]^{-1}$, $V_C = 4$ мбіт/с і збільшенні частотного ресурсу майже удвічі, а саме $V_C = 7,996534$ мбіт/с,

був знайдений код, довжиною блоку $n = 2850$, який забезпечив достовірну передачу.

Тепер змінимо лише початкову швидкість передачі інформації $V_c = 8$ Мбіт/с, коли усі інші параметри залишаться сталі. Інакше кажучи, визначимо наскільки потрібно збільшити частотний ресурс, щоб задовольнити дві умови зазначені вище, при цьому довжина блоку коду повинна бути $n = 2850$ символів.

Тобто, для оцінки утримання продуктивності за рахунок частотного ресурсу буде вирішуватись обернена задача до вирішеної у пункті 3.1. Оскільки методика залишається незмінною і представлена графічно на рисунку А.1, занесемо одразу отримані результати у таблицю.

Таблиця 3.6 – Визначення кількості ресурсу при фіксованому параметрі довжини блоку коду ($n = 2850$)

V_c , Мбіт/с	r_c	p_6	k	V_s , Мбіт/с	R , Мбіт/с
8	–	$5,86 \cdot 10^{-2}$	$5,86 \cdot 10^4$	32	21,698044
25,18468	0,438	$1,13 \cdot 10^{-1}$		44,10080396	21,698044

Аналізуючи дані з таблиць 3.3 та 3.6 побудуємо графік залежностей k від ΔF .

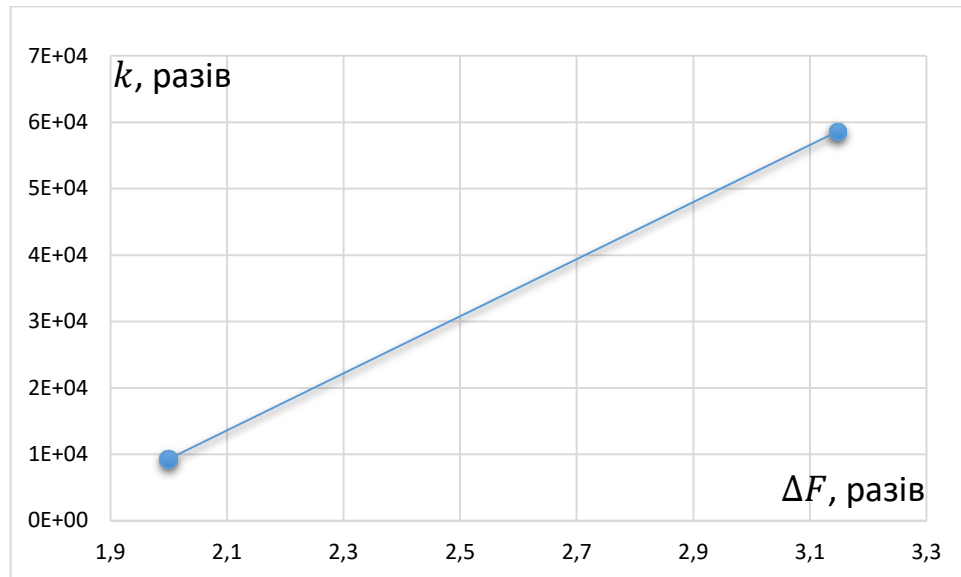


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності помилки від частотного ресурсу

Звернувши увагу на рисунок 3.5, можна помітити, що при використанні коду з фіксованою довжиною блоку, важливі початкові умови. Початкова канална швидкість передачі та ймовірність помилки на біт (недостовірна передача), оскільки вони пов'язані між собою, впливають на те, яку кількість додаткового ресурсу потрібно використати, щоб домогтись виконання умов сталості продуктивності джерела повідомлення та забезпечення заданої достовірності передачі.

При вирішенні задачі забезпечення заданої достовірності у пункті 3.1 частотний ресурс було збільшено у 1,9991 разів та при цьому було визначено параметри блокового коду довжиною блоку $n = 2850$, який задовольнив умови сталості продуктивності і необхідної достовірності. У свою чергу, в даному пункті роботи, можна побачити, що використовуючи той самий код, можливо досягти поставленої задачі, навіть, при зміні початкових умов. Але ціною за вирішення задачі при умовах розглянутих у цьому пункті стала більша кількість частотного ресурсу. Тобто чим гірша початкова ймовірність помилки тим більше частотного ресурсу потрібно використати щоб утримати продуктивність незмінною.

3.4 Опис методики забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду за умов сталої швидкості джерела повідомлень

Дана методика об'єднує у собі декілька інструментів: біноміальну модель генерації помилок та методику аналізу завадостійких можливостей блокових кодів на основі границь Плоткіна та Варшамова-Гільберта. Ці інструменти були описані і представлені вище. На основі цього була сформована методика забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів надлишкових кодів. Графічний приклад цієї методики з використанням інструментів представлений у додатку А.

Методика передбачає покрокове визначення параметрів передачі системи зв'язку. На рисунку А.1 кроки позначені червоними цифрами.

Якщо використовувати дану методику для визначення параметрів системи передачі за умов сталої продуктивності чи швидкості джерела повідомлення, потрібно пам'ятати про взаємозв'язок усіх параметрів, оскільки незначна зміна якогось одного з них, може опосередковано сильніше вплинути на параметр, який не пов'язаний прямою залежністю з параметром, який змінюється.

Тобто, використовуючи дану методику можна вирішити обидві задачі: забезпечити достовірність при незмінності продуктивності та забезпечити достовірність при незмінності швидкості джерела повідомлення.

Перший крок – це обрати тип модуляції, яка впливає на початкову ймовірність помилки. Після аналізу оцінки утримання продуктивності проведеному у пункті 3.3, важко не зрозуміти, наскільки це важливий крок – раціонально обрати тип модуляції. Також потрібно пам'ятати про вплив модуляції на продуктивність (рис. 2.6).

Наступним кроком є визначення виправної здатності коду, який може забезпечити задану достовірність. Для цього необхідно визначитись с довжиною блоку коду, після чого використавши біноміальний розподіл,

визначити виправну здатність коду. Навіть до вибору довжини блоку коду потрібно підходити обережно, оскільки код з більшою кількістю символів має більшу швидкість, тобто менше відбирає ресурсу у джерела для кодування символів. Но при цьому кожний код має свої граничні можливості, що було продемонстровано для кодів Хеммінга у пункті 2.2.3.

Після знаходження виправної здатності, використовуючи границі Плоткіна та Варшамова-Гільберта визначаються найкращі та реальні можливості надлишкових кодів. Для вирішення задачі використовується найкращий код, оскільки треба завжди намагатися наблизитися до пропускної здатності.

Після визначення всіх цих параметрів, можливо визначити швидкість та продуктивність джерела повідомлень.

Оскільки методика базується на ітеративній процедурі, правильне розуміння взаємозв'язків параметрів дозволяє раціонально маніпулювати частотним ресурсом та обирати довжину блоку коду.

В цілому методика забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів блоку коду при умовах сталості продуктивності чи швидкості джерела повідомлень, здійснюється у два етапи:

- Спочатку методом ітерації знаходяться параметри надлишкового коду, які можуть забезпечити найбільшу схожість продуктивності чи швидкості джерела повідомлень, але при цьому різниця між ними буде, хоч і невелика;
- Після визначення найбільш підходящого надлишкового коду, потрібно провести корекцію частотного ресурсу, тобто каналної швидкості передачі, щоб продуктивність чи швидкість джерела повідомлень збіглося з початковим значенням при недостовірній передачі. Це можливо, оскільки незначна зміна частотного ресурсу суттєво впливає на продуктивність та швидкість джерела повідомлення, а вплив на початкову ймовірність помилки мізерний, що призводить до незмінності параметрів знайденого коду.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Головним інструментом для вирішення проблем та поставлених задач являються надлишкові коди, а найголовнішим параметром цих кодів є довжина блоку коду, яка при правильному виборі завжди може забезпечити поставлені вимоги;

2. При збільшенні довжини блоку для кодування, можна добитися потрібної швидкості джерела при меншій швидкості передачі символів у каналі зв'язку;

3. При вирішенні даних проблем та поставлених задач при використанні додаткового ресурсу потрібно раціонально оперувати цим ресурсом, тобто потрібно знаходити баланс між параметром надлишкового коду та об'ємом використаного ресурсу для забезпечення заданих вимог, оскільки чим більше ресурсу ми використовуємо, тим дорожча ціна утримання продуктивності, яка виражається в ймовірності помилки на біт;

4. При фіксованій енергетиці каналу зв'язку можна змінити тип модуляції, понизивши її кратність, при цьому зросте завадостійкість каналу зв'язку, але при цьому потрібно враховувати також одночасне зниження виправної здатності коду, а значить і швидкості кодування, через те потрібно знаходити інші параметри надлишкового коду, які забезпечать задані вимоги.

ВИСНОВКИ

Дана робота була присвячена коригуючим властивостям надлишкових кодів, за допомогою яких можливо забезпечити необхідну достовірність, навіть, при деяких обмеженнях та умовах відносно каналу зв'язку. Були розроблені рекомендації щодо методики синтезу блокових кодів, що забезпечують незмінність продуктивності та швидкості передачі джерела повідомлень.

В першому розділі доводилася актуальність та обґрунтовувалася структура роботи. Було визначено найголовнішу потребу споживача телекомунікаційних послуг, а потім розібрано декілька прикладів сучасних систем зв'язку, що задовольняють її. Розібрали характеристики ресурсів каналу зв'язку що використовують сучасні телекомунікаційні системи.

У другому розділі наведені теоретичні відомості щодо взаємозв'язків параметрів ресурсів системи зв'язку та інструментів забезпечення необхідної достовірності передачі інформації при фіксованих ресурсах каналу зв'язку.

У третьому розділі приведена методика забезпечення заданої достовірності за умов сталої швидкості джерела повідомлень за допомогою інструментів представлених у попередніх розділах, яка передбачає собою формулювання рекомендації щодо синтезу блокових кодів, що забезпечать потрібні вимоги.

Можливості надлишкових кодів з точки зору математичних виразів є безграничні, завжди можна знайти такі їх параметри, які забезпечать необхідну достовірність при різних обмеженнях та вимогах. Але потрібно реально оцінювати можливість існування цього коду. Завжди потрібно пам'ятати, що система зв'язку – це дуже складна інфраструктура, у якій всі параметри взаємопов'язані, тому ні в якому разі не потрібно впадати у крайності та вирішувати проблеми телекомунікацій спираючись на один параметр.

Результатом роботи є запропонована методика забезпечення заданої достовірності за умов сталості швидкості джерела повідомлень з покроковим описом вибору типу модуляції та параметрів надлишкових кодів.

При дослідженні було виявлено, що задача має два напрямки рішення, оскільки можливо утримувати не тільки продуктивність, а й швидкість джерела повідомлення.

Подальші дослідження будуть більш детально присвячені раціональному використанню ресурсів каналу зв'язку, тобто раціональному вибору параметрів системи передачі для забезпечення заданої достовірності при умовах сталості продуктивності чи швидкості джерела повідомлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сальников И.И. Основные этапы развития информационных потребностей человека // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 10. – С. 186-188.
2. G.S.V. Radha Krishna Rao, G. Radhamani. WiMAX: A Wireless Technology Revolution. — 2007, ISBN 0-8493-7059-0.
3. Shannon C. E. A mathematical Theory of Communication [Text] / C. E. Shannon. – The Bell System Technical Journal, vol. 27., 1948. – pp. 379–423, 623–656.
4. Rec. ITU-R M.1645, Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.
5. REPORT ITU-R M.2134 Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s).
6. Moray Rumney. IMT-Advanced: 4G Wireless Takes Shape in an Olympic Year // Agilent Measurement Journal, September 2008.
7. Report ITU-R M.2135-1 (12/2009) Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced.
8. Урывский Л. А. Основы прикладной теории информации для телекоммуникаций [Текст] : диссертация доктора технических наук : 05.12.02 / Л. А. Урывский; Киев, НТУУ «КПИ». – К. : 2009. – 377 с.
9. Дмитриев В. И. Прикладная теория информации: учебник для вузов [Текст] / В. И. Дмитриев. – М. : Высшая школа, 1989. – 320 с.
10. Духин А. А. Теория информации [Текст] / А. А. Духин. – М. : Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.
11. J.G. Proakis, Digital Communications, D.D. Klovskii, Ed. Moscow, Russia: Radio i Svyaz, 2000 (in Russian).
12. G. Hudiakov, “Development of the evaluation capacity theory of electricity and radio systems”, Komponenti i Tekhnologii, no. 7, pp. 147–154, 2011 (in Russian).

- 13.Ільченко М. Ю. Основи теорії телекомунікацій / Підручник / За заг. ред. проф. Ільченка М.Ю. – К.: 2010. – ІССЗІ НТУУ «КПІ» – с.786, іл.
- 14.Art of Doing Science and Engineering: Learning to Learn / Richard R. Hamming. - К.: 2003. – CRC Press – с.376.
- 15.Gallager R. G. Information Theory and Reliable Communication [Text] / R. G. Gallager. – Wiley, 1968. – 588 p
- 16.Берлин А. Н. Цифровые сотовые системы связи [Текст] / А. Н. Берлин. – М. : Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
- 17.Галлагер Р. Коды с малой плотностью проверок на четность [Текст] / Р. Галлагер ; М. : «Мир», 1966. – 144 с.
- 18.Беркман Л. Н. Багатоканальні модеми [Текст] : Монографія / Л. Н. Беркман, І. С. Щербина, О. І. Чумак, Л. В. Рудик // За наук. ред. С. Є. Захаренка. – К. : Зв'язок, 2006. – 149 с.
- 19.Бородин Л. Ф. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования [Текст] / Л. Ф. Бородин. – М. : Сов. радио, 1968. – 408 с.
- 20.Бриллюэн Л. Наука и теория информации [Текст] / Л. Бриллюэн, пер. с англ. А. А. Харкевича. – М. : Физматгиз, 1960. – 392 с.
- 21.Cover T. M. Elements of Information Theory, 2nd ed. [Text] / T. M. Cover, J. A. Thomas. – Wiley-Interscience, 2006. – 772 p.
- 22.Ільченко М. Ю. Сучасні телекомунікаційні системи [Текст] / М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук. – К. : Наук. думка, 2008. – 328 с.
- 23.Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] / А. Г. Зюко // 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Связь, 1972. – 360 с.
- 24.Прокопенко Е. А. Повышение информационных возможностей каналов с многопозиционными сигналами в системах беспроводной связи [Текст] : диссертация кандидата технических наук : 05.12.02 / К. А. Прокопенко; Киев, НТУУ «КПИ». – К. : 2011. – 175 с.
- 25.Коржик В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений [Текст]: справочник / В. И. Коржик, Л. М. Финк, К. Н. Щелкунов. – М. : Радио и связь, 1981. – 231 с.

- 26.Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л. М. Финк ; М. : «Советское радио», 1970. – 728 с.
27. MacWilliams F. J., Sloane N. J. A. “The Theory of Error-Correcting Codes. Parts 1, 2”, Bell Laboratories, NJ, USA. – 1977. – 744 p.
28. Hanzo L. Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MCCDMA Systems, 3rd ed [Text] / L. Hanzo, S. X. Ng, T. Keller, and W. T. Webb. – Piscataway, NJ: IEEE Press/Wiley, – 2004. – 1036 p.
29. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки [Текст] / У. Питерсон, Э. Уэлдон. // М. : «МИР», 1976. – 594 с.
30. Жураковський Ю. П. Теорія інформації та кодування [Текст] : підручник / Ю.П. Жураковський, В.П. Полторак. – К.: Вища шк., 2001. – 255 с
31. Уривський Л.О., Пешкін А.М. Методика оцінки граничної інформаційної ефективності завадостійких кодів// Information and Telecommunication Sciences, – К.: NTUU 'KPI'. – 2016. – № 2. – p.70-74.
32. Урывский Л. А., Прокопенко Е. А., Пешкин А. М. Выбор блочного помехоустойчивого кода по критерию максимального приближения к границе Шеннона // Telecommunication Sciences. – К.: NTUU 'KPI'. – 2011. – № 1. – С. 41-47.
33. Uryvsky L., Prokopenko K., Peshkin A. The convolutional codes analysis technique on the optimum block codes grounds// Information and Telecommunication Sciences. – К.: NTUU 'KPI'. – 2014. – № 2, p.8-13.
34. Урывский Л.А., Пешкин А.М. Оценка энергетических границ использования каскадных кодов – Budapest, Hungary: The scientific heritage - № 8, 2017, p. 91-97.
35. Uryvskiy L. Pieshkin A. The informational efficiency improving methods of the signal-code constructions with the condition of providing required reliability - Budapest, Hungary: The scientific heritage - № 11, 2017 - p.p. 72...77.

- 36.Пешкін А.М. Порівняння методик синтезу параметрів коригуючих кодів для оцінки їх завадостійких властивостей// 4-а міжнародна науково-практична конференція Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки 23-25 жовтня 2014 р., - Чернівці, Україна - Збірник тез, с.95-96.
- 37.Урывский Л.А., Пешкин А.М. Исправляющая способность блочных помехоустойчивых кодов в пределах аксиоматики Шеннона// 2-а міжнародна конференція молодих вчених «Інфокомунікації — сучасність та майбутнє». Збірка тез, ч.1. — Одеса: ОНАЗ, — 2012 — с. 33...36.
- 38.Уривський Л.О., Прокопенко К.А. Визначення границь коригувальних властивостей блокових кодів // Збірник наукових праць — Львів, «Львівська політехніка», 2011, №705, с. 98 — 104.
- 39.Uryvsky L., Pieshkin A. Assessment of Information Efficiency of Error-correcting Codes in Plotkin bound [Електронний ресурс] // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки. — 2017.
- 40.Пешкін А.М. Формування сигнально-кодових конструкцій на основі кодів, забезпечуючих максимальне наближення до границі Шеннона [Текст] : дисертація кандидата технічних наук : 05.12.02 / А.М. Пешкін; Київ, НТУУ «КПІ». — К. : 2018. — 149 с.
- 41.Рубцов А. Е. Влияние неточности оценки канала на вероятность битовых ошибок систем связи с М-QAM модуляцией [Текст] / А. Е. Рубцов, В. С. Шпагина // Труды (седьмой) научной конференции по радиофизике, 7 мая 2003. Ред. А. В. Якимов. — Нижний Новгород: ТАЛАН, 2003. — с. 216–217.
- 42.Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] / Дж. Кларк, Дж. Кейн. — М. : Радио и Связь, 1987. — 195 с.
- 43.Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. -М.: Техносфера, 2005 — 320 с.

ДОДАТОК А

Методика забезпечення заданої достовірності на основі вибору типу модуляції та параметрів надлишкових кодів

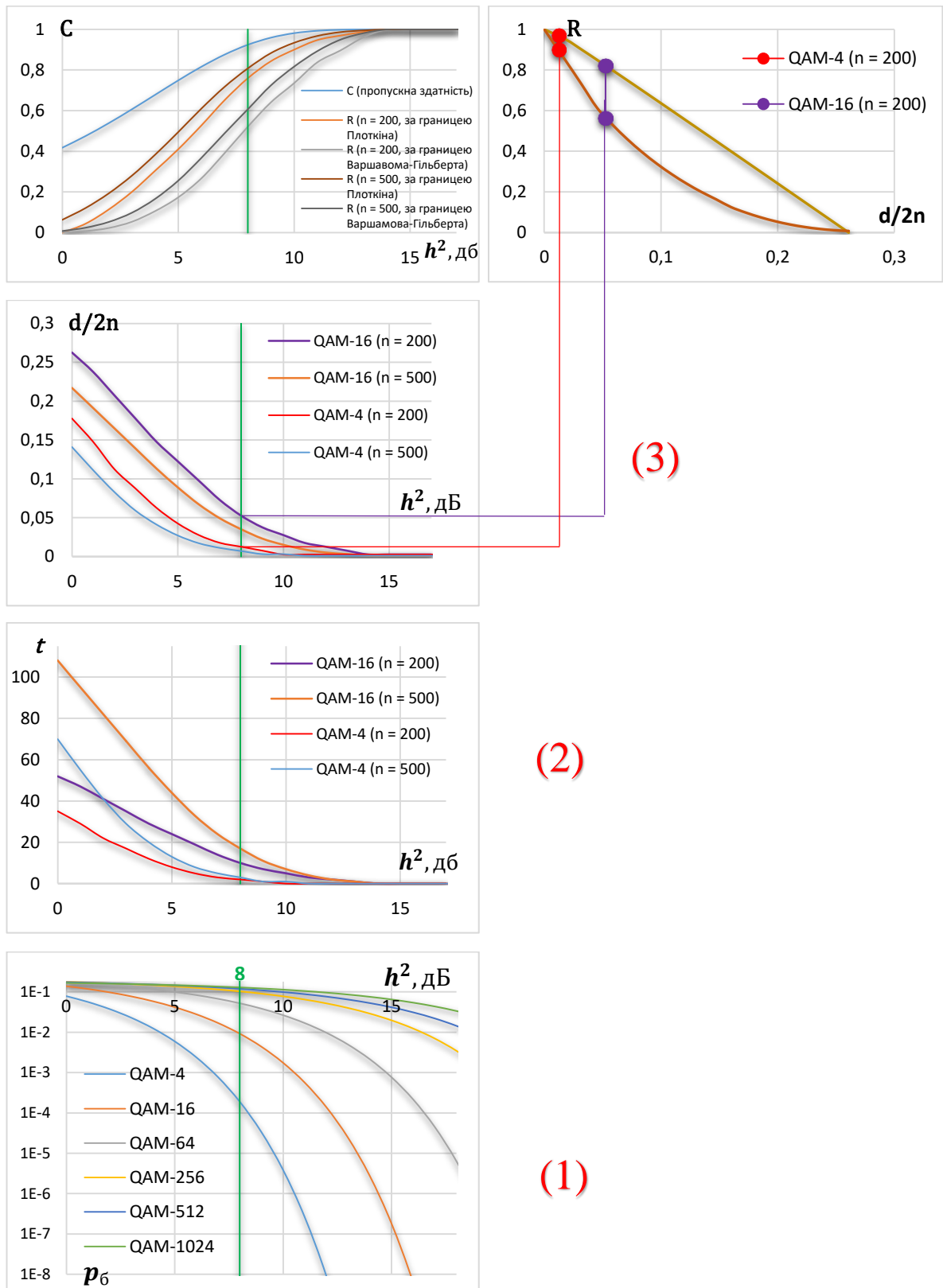


Рисунок А.1 – Методика забезпечення заданої достовірності ($h^2 = 8$ дБ)